

1100143

LAPORAN KEGIATAN PENELITIAN



Pembuatan *Dynamic Model* untuk *Linear Spring Actuator* Berbasis *Smart Material* Ni-Ti SM495

Oleh :
Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE
Sugiarto, ST, MT
Wisnu Cahya Kurniawan

Dilaksanakan atas biaya Dana DIPA
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya berdasarkan kontrak
Nomor: 28/J.10.1.31/PG/2008
Tanggal 23 Juni 2008

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
2008**



LEMBAR IDENTITAS DAN HALAMAN PENGESAHAN KEGIATAN PENELITIAN

1. Judul Penelitian

***Pembuatan Dynamic Model untuk Linear Spring Actuator
Berbasis Smart Material Ni-Ti SM495***

2. Ketua Peneliti

- a. Nama Lengkap : Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE
- b. Pangkat/Gol./NIP : Penata/IIIb/132 048 543
- c. Jabatan Fungsional : Asisten Ahli
- d. Jabatan Struktural :
- e. Fakultas/Jurusan : Teknik Mesin

3 Anggota Pelaksana Kegiatan

- a. Nama Anggota Pelaksana : Sugiarto, ST, MT
- b. Nama Anggota Pelaksana : Wisnu Cahya Kurniawan

4. Lokasi Penelitian : Laboratorium Proses Produksi II

5. Jangka Waktu Penelitian : 6 bulan

6. Biaya Penelitian : Rp. 10.000.000,- (Sepuluh Juta Rupiah)

7. Sumber Dana : Dana DIPA Tahun Anggaran 2008

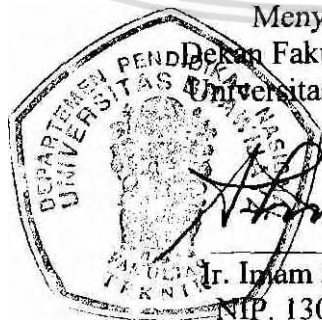
Malang, 25 Nopember 2008
Ketua Pelaksana

Mengetahui
Ketua BPP Fakultas Teknik
Universitas Brawijaya


Dr. Ir. Arief Rachmansyah
NIP. 132 059 302


Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE
NIP. 132 048 543

Menyetujui,
Dekan Fakultas Teknik
Universitas Brawijaya


Ir. Imam Zaky, MT.
NIP. 130 604 494



RINGKASAN DAN SUMMARY

Penelitian ini mengetengahkan hasil percobaan yang telah dilakukan pada bahan *SMA* (*Shape Memory Alloy*) Nikel Titanium (*NiTi*). Penelitian tersebut bertujuan untuk mendapatkan model dinamik dari *Linear Spring Actuator*(*LSA*) yang memperoleh variasi temperatur dan pembebanan. Karakteristik yang diperoleh dari variasi temperatur dan pembebanan pada *LSA* tersebut berupa energi mekanik yang ditunjukkan oleh material ketika transformasi balik ke bentuk semula.

Bahan *SMA*s yang digunakan pada penelitian berupa suatu kawat yaitu *NiTi SM495*. Hasil percobaan yang dilakukan menggambarkan karakteristik bahan *SMA* yang mendapat beban kemudian dipanaskan dengan *power supply* AC yang mempunyai arus listrik sebesar 5 Ampere untuk mendapatkan transformasi baliknya (*Shape Memory Effect*). Energi mekanik yang dihasilkan dilihat dari besarnya perpindahan beban yang mampu diangkat oleh bahan *NiTi* tersebut. Data perpindahan tersebut diolah sehingga didapatkan energi mekanik yang menunjukkan kemampuan angkat dari bahan *NiTi* dengan beban tertentu pada penambahan temperatur. Demikianlah penelitian tersebut dilakukan. Grafik yang diperoleh dari percobaan menggambarkan model dinamik hubungan antara penambahan temperatur terhadap energi mekanik *LSA*.

Kata Kunci. *Linear Spring Actuator, Shape Memory Alloy, Shape Memory Effect, NiTi*

This report is result of experiment on Shape Memory Alloy NiTi SM495. The aim of experiment is for getting dynamics model of Linear Spring Actuator (LSA). The dynamics model describes the characteristic of mechanical energy of LSA under various temperature and load. In experiment the LSA was charged by electricity with current 5 A and voltage 18 Volt. The electricity set up the heat which is used by LSA specimen for back transformation in to its former form or to set up Martensite-Austenite Temperature Transformation. The back transformation shows Shape Memory Effect Phenomenon.

Keywords *Linear Spring Actuator, Shape Memory Alloy, Shape Memory Effect, NiTi*

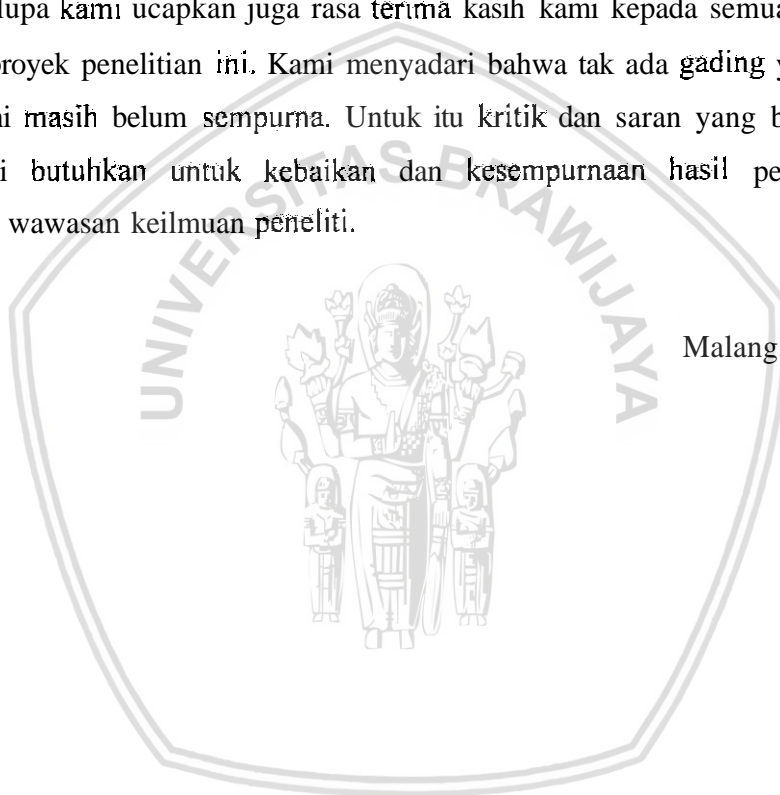
PRAKATA

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Besar bahwa pada akhirnya laporan hasil penelitian ini dapat terselesaikan sesuai dengan perjanjian kontrak penelitian yang telah dibuat. Dalam kesempatan ini kami ucapkan beribu terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Brawijaya selaku penyandang dana proyek penelitian ini, sehingga gagasan kami dapat terwujud serta semakin memacu kami untuk berkreasi, belajar dan bekerja lebih bagus lagi

Tak lupa kami ucapkan juga rasa terima kasih kami kepada semua pihak yang telah membantu proyek penelitian ini. Kami menyadari bahwa tak ada gading yang tak retak dan penelitian ini masih belum sempurna. Untuk itu kritik dan saran yang bersifat konstruktif sangat kami butuhkan untuk kebaikan dan kesempurnaan hasil penelitian ini serta penambahan wawasan keilmuan peneliti.

Malang, Nopember 2008

1 im Peneliti



DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
RINGKASAN DAN SUMMARY	ii
PRAKATA	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
I. PENDAHULUAN	1
II. TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1. Penelitian Sebelumnya	3
2.2. Material	4
2.3. Shape Memory Alloys	6
2.3.1. Pengertian <i>Shape Memory Alloys</i>	6
2.3.2. Prinsip Kerja <i>Shape Memory Alloys</i>	7
2.3.3. <i>Shape Memory Effect</i>	10
2.3.4. <i>Super elasticity</i>	12
2.4. Nikel dan Titanium	12
2.4.1. Nikel	12
2.4.2. Titanium	13
2.4.3. Paduan Nikel dan Titanium	14
2.5. Perbandingan Diagram Tegangan Regangan Baja Lunak dan NiTi	17
2.5.1. Teori Tegangan dan Regangan	17
2.5.2. Prinsip Diagram Tegangan-Regangan	18
2.5.3. Diagram Tegangan-Regangan <i>SMA</i> s	19
2.6. Elastisitas dan Hukum Hooke	20
2.7. Energi Mekanik	22
2.8. Aktuator	23
2.9. Hipotesis	24

III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	25
IV. METODE PENELITIAN	26
4.1. Variabel Yang Diteliti	26
4.1.1. Variabel Bebas	26
4.1.2. Variabel Terikat	26
4.1.3. Konstanta	26
4.2. Rancangan Penelitian	27
4.3. Alat-alat Penelitian	28
4.4. Spesifikasi Bahan yang Digunakan	30
4.5. Instalasi Alat Penelitian	30
4.6. Tempat Penelitian	30
4.7. Prosedur Penelitian	30
4.8. Analisa Statistik	31
4.9. Kegiatan dan Diagram Alir Penelitian	33
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	39
5.1. Data Hasil Penelitian	39
5.2. Analis Varian	40
5.3. Analisis Statistik	41
5.3.1. Analisis Statistik Dengan Beban 250 gr	41
5.3.2. Analisis Statistik Dengan Beban 300 gr	41
5.3.3. Analisis Statistik Dengan Beban 350 gr	42
5.3.4. Analisis Statistik Pengaruh Pengulangan Perlakuan Pada Beban 250 gr	
5.3.5. Analisis Statistik Pengaruh Pengulangan Perlakuan Pada Beban 300 gr	
5.3.6. Analisis Statistik Pengaruh Pengulangan Perlakuan Pada Beban 350 gr	45
5.4. Pembahasan	47
5.4.1. Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi (250gr)	
5.4.2. Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi (300gr)	

5.4.3. Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi (350gr)	
5.4.4. Grafik Hubungan Waktu Terhadap Jarak (<i>Average</i>)	
5.4.5. Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Jarak	
5.4.6. Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi (250 gr, 300gr, 350 gr)	52
5.4.7. Grafik Hubungan Waktu Terhadap Temperatur	53
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	54
5.1. Kesimpulan	54
5.2. Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Perbandingan dan perbedaan dari <i>smart technologies</i>	5
Tabel 4.1	Data Rancangan Pengujian Variasi Ternperatur terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi Dengan Beban 250 gr	
Tabel 4.2	Data Rancangan Pengujian Variasi Temperatur terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi Dengan Beban 300 gr	
Tabel 4.3	Data Rancangan Pengujian Variasi Temperatur terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi Dengan Beban 350 gr	27
Tabel 4.4	Analisis Statistik	31
Tabel 4.5	Analisis Varian Satu Arah	33
Tabel 5.1	Data hasil pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 250 gr	
Tabel 5.2	Data hasil pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 300 gr	
Tabel 5.3	Data hasil pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 350 gr	
Tabel 5.4	Analisis varian pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 250 gr	
Tabel 5.5	Analisis varian pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 300 gr	
Tabel 5.6	Analisis varian pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 350 gr	
Tabel 5.7	Analisis varian pengaruh pengulangan perlakuan pada paduan NiTi terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 250 gr	
Tabel 5.8	Analisis varian pengaruh pengulangan perlakuan pada paduan NiTi terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 300 gr	45
Tabel 5.9	Analisis varian pengaruh pengulangan perlakuan pada paduan NiTi terhadap energi mekanik paduan NiTi	46



DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 1.1	<i>Thermostatic control valve</i>	2
Gambar 1.2	<i>Schematic Thermostatic Control Valve</i>	2
Gambar 1.3	<i>First Joint in Flexion</i>	2
Gambar 1.4	<i>Aluminum Finger Prototype</i>	2
Gambar 2.1	Grafik Modulus Elastisitas Sebagai Fungsi Dari Temperatur	4
Gambar 2.2	<i>SMA</i> s yang mengalami beban tarik	6
Gambar 2.3	<i>Cryofit hydraulic fluid Coupling</i>	7
Gambar 2.4	<i>Actuated Hand NiTi</i>	7
Gambar 2.5	Fase Martensit dan Austenit	8
Gambar 2.6	<i>Microscopic Views</i> pada <i>SMA</i> s	8
Gambar 2.7	Hubungan antara perubahan fase temperatur terhadap beban	9
Gambar 2.8	Grafik Hubungan Temperatur Transformasi dan Tegangan	9
Gambar 2.9	Diagram mikroskopik dari karakteristik <i>shape memory effect</i>	10
Gambar 2.10	<i>One-way</i> dan <i>two-way memory effect</i>	11
Gambar 2.11	Diagram beban dan temperatur pada kondisi <i>superelasticity</i>	12
Gambar 2.12	Kurva <i>Hysteresis</i> NiTi	14
Gambar 2.13	Diagram Fase NiTi	15
Gambar 2.14	<i>Micro-robot actuated by NiTi</i>	16
Gambar 2.15	Batang prismatik yang mengalami tarik	17
Gambar 2.16	Diagram tegangan-regangan baja lunak	19
Gambar 2.17	Diagram tegangan-regangan dari <i>SMA</i> s yang menunjukkan SME	20
Gambar 2.18	Diagram tegangan-regangan dari <i>superelastic SMA</i> s	21
Gambar 2.19	Gambaran umum aktuator NiTi	24
Gambar 4.1	Proses pembuatan spesimen uji dari bahan NiTi	34
Gambar 4.2	Dapur Listrik untuk Proses Pemherian Memori Bahan NiTi SM 495	35
Gambar 4.3	Proses percobaan pada aktuator dari bahan NiTi SM495	35
Gambar 4.4	Proses pemberian panas pada aktuator dari bahan NiTi	36
Gambar 4.5	Pengukuran pergerakan aktuator dengan <i>Distance Photosensor</i>	36

Gambar 4.6	Diagram Alir Penelitian	
Gambar 4.7	Skematika Instalasi Pengujian Bahan Nikel Titanium SM 495 <i>Wire</i>	38
Gambar 5.1	Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi Dengan Beban 250 gr	
Gambar 5.2	Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi Dengan Beban 300 gr	
Gambar 5.3	Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi Dengan Beban 350 gr	49
Gambar 5.4	Hubungan Waktu Terhadap Perubahan Jarak	50
Gambar 5.5	Hubungan Perubahan Temperatur Terhadap Perubahan Jarak	51
Gambar 5.6	Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi Dengan Beban 250 gr, 300 gr, 350 gr (Average)	52
Gambar 5.7	Hubungan Laju Perubahan Temperatur Terhadap Waktu	53



BAB I

PENDAHULUAN

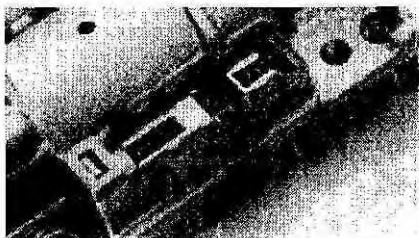
Penggunaan *Shape Memory Alloy (SMA)* sebagai aktuator, sensor maupun produk-produk industri lainnya dewasa ini demikian pesat. Penggunaan *SMA* untuk berbagai kepentingan tersebut didasarkan pada suatu fenomena yang disebut sebagai *Shape Memory Effect (SME)*

SMA adalah material yang memiliki kemampuan untuk kembali pada bentuk awalnya ketika dipanaskan. Saat *SMA* dalam keadaan dingin atau dibawah temperatur transformasinya maka material tersebut memiliki kekuatan luluh yang rendah dan dapat dengan mudahnya mengalami deformasi. Akan tetapi saat material tersebut dipanaskan diatas temperatur transformasinya maka akan terjadi perubahan struktur kristal pada material yang menyebabkan kembali ke bentuk semula.

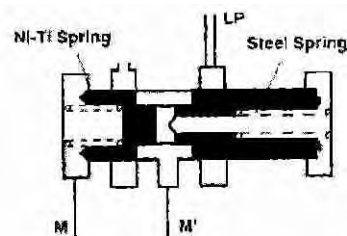
SMA yang banyak digunakan adalah jenis paduan antara *Nickel* dan *Titanium* yang sering disebut sebagai *Nitinol*. Material paduan ini memiliki sifat listrik dan mekanik yang baik, umur kelelahan material yang lama (*Long Fatigue Life*) serta ketahanan korosi yang tinggi. Sebagai bahan Aktuator material ini mampu mengalami regangan (*strain*) sampai 5% bahkan lebih dan dapat kembali ke bentuk semula ketika dipanaskan. *Nitinol* juga mampu kembali ke bentuk asal setelah menerima beban sebesar 344,738 MPa untuk siklus yang berulang kali. Sebagai contoh kawat *Nitinol* dengan diameter 0,507 mm dapat menerima beban sebesar 71,17 Newton. Pada umumnya dibuat agar temperatur ruang selalu jauh berada dibawah temperatur transformasi *SMA* dengan penambahan panas yang intensif akan membuat *SMA* menunjukkan perubahannya. Pada prinsipnya *Nitinol* adalah suatu aktuator, sensor dan pemanas.

Salah satu contoh aplikasi *Thermal Shape Memory* pada paduan Ni-Ti adalah *thermally responsive pressure control valve* pada *Mercedes-Benz otomatic transmissison*. Untuk meningkatkan kenyamanan perubahan gigi, tekanan perubahan gigi pada transmisi reduksi selama penyalaan saat keadaan dingin dan meningkat lagi ketika transmisi mencapai temperatur operasi. Gambar 1.1 sedangkan skematiknya ditunjukkan pada Gambar 1.2. Kenyamanan ini dapat tercapai karena: temperatur A_f yang diperlukan adalah 60°C dengan toleransi $\pm 5^{\circ}\text{C}$, spring terendam semua pada

transmission fluids, dengan begitu pemanasan dan pendinginan akan berjalan lambat dan sangat seragam.



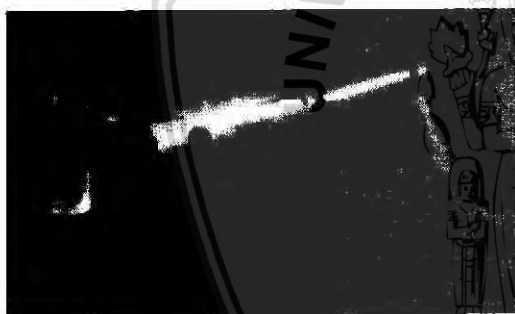
Gambar 1.1: Thermostatic control valve
Thermostatic



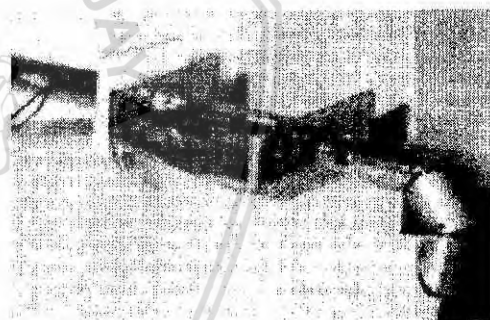
Gambar 1.2: Schematic
Control Valve

Sumber: EUROflex G. RAU GmbH 2000

Gaya yang diperlukan sangat rendah (kira-kira 5N), perubahan jarak sangat kecil, suhu lingkungan maksimum adalah 130°C. Aplikasi Ni-Ti lainnya pada bidang robotika yaitu penggunaan SMA sebagai penggerak lengan robot seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.3 dan 1.4.



Gambar 1.3. First Joint in Flexion



Gambar 1.4. Aluminum Finger
Prototype

Sumber: K J DeLaurentis et al

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

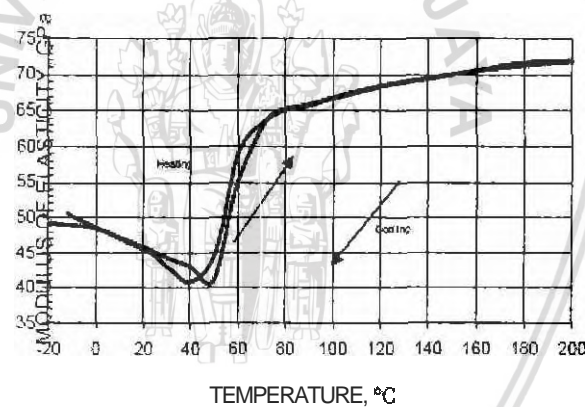
2.1 Penelitian Sebelumnya

- (Dunlop R., et.al.,2002)Telah berhasil menggunakan *Shape Memory Alloy Nitinol* sebagai actuator pada *sfewurt platform mechanism* yang diketahui sebagai mekanisme parallel robot dan sering digunakan sebagai *flight simulator*. Dalam penelitiannya digunakan 6 buah kawat *Nitinol* sebagai tiang pada *stewart platform* tersebut. Kawat *Nitinol* tersebut dikendalikan secara binary(*binary actuated*) yang di-switching hidup dan mati untuk menentukan posisi *stewart platform*. Binary control yang diterapkan pada 6 kawat nitinol tersebut menghasilkan 60 kemungkinan posisi *stewart platform*.
- Fillipo Mora et. al (2004) meneliti tentang perancangan aktuator berbahan dasar *Shape Memory Alloys (SMAs)* dan dibandingkan dengan beberapa jenis aktuator konvensional lainnya seperti motor listrik dan piston hidrolik. Pada penelitian tersebut digunakan *SMAs* jenis *wire* dengan beberapa variasi diameter untuk meneliti *performance* dari aktuator *SMAs*. Dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa aktuator dari bahan *SMAs* memiliki beberapa kelebihan antara lain: desain yang kompak, ringan dan memiliki kemampuan dalam menahan beban yang lebih besar dari ukuran material
- (Vela'zquez R.,et.al.,2005)Melakukan kombinasi antara komputasi dan *experiment* pada studi tentang *Shape Memory Alloy* sebagai bahan mikro aktuator linear yang bekerja berdasarkan prinsip antagonis. Pada penelitian tersebut digunakan paduan Ni-Ti berbentuk pegas lilitan (*Hellical Spring*) yang diberi arus listrik dan berfungsi sebagai aktuator. Sifat *Thermomechanic* pada *SMA* tersebut kemudian dievaluasi dengan menggunakan model yang dibuat dan *experiment*.
- Pai Mizar, Shivananda, 2005," *Thermomechanical Characterization of Nitinol and Nitinol Based Structures using ACES Methodology*".Pada disertasi diatas menerangkan bahwa penggunaan nitinol pada aplikasi perekayasaan adalah sangat penting. Kasus yang berusaha dijelaskan pada disertasi ini adalah pengertian dasar mengenai nitinol dan tingkah laku dinamik dari komposit nitinol karena pengaruh panas. ACES methodology yang digunakan ada 3 yaitu: Untuk solusi analitik menggunakan *energy based method*, untuk komputational menggunakan *finite*

element method (FEM) dan untuk solusi eksperimental menggunakan *optoelectronic holography (OEH)*.

Spesimen yang diteliti pada penelitian ini adalah berbentuk pita dengan dimensi penampang melintang sebesar $2250 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$. Sebelum di uji, spesimen di *heat treatment* pada temperatur $400\text{-}500^\circ\text{C}$ selama 2,5 jam untuk menghilangkan *residual stress* yang disebabkan oleh proses pembentukan. Setelah itu, spesimen diberikan beban sebesar 50-70 N supaya mempunyai distribusi tegangan yang merata. Prosedur penelitiannya adalah dengan cara memberikan variasi temperatur pada spesimen, sehingga didapatkan data perubahan mekanik bahan sebagai fungsi dari temperatur. Data tersebut kemudian diolah pada instrumen *Opto-electronic hulography (OEH)* untuk mendapatkan *properties material*. Salah satu kesimpulan dari penelitian ini menyatakan bahwa modulus elastisitas nitinol merupakan fungsi non-linier terhadap temperatur.

Berikut adalah grafik hasil pengukuran modulus elastisitas nitinol menggunakan instrumen (OEH).



Gambar 2.1 . Grafik Modulus Elastisitas Sebagai Fungsi Dari Temperatur
Sumber : Shivananda Pai Mizar, 2005 81

2.2 Material

Secara garis besar berdasarkan fungsinya *material* dapat dibagi menjadi

- *Actuation Material*

Electrorheological Fluids, Shape Memory Material, Piezoelectric Material, Magnetostrictive Material, Liquid Crystal.

- *Sensing Material*

Fiber Optic Material, Shape Memory Material, Piezoelectric Ceramic, Strain Gauge, Acoustical Devices, Biosensor Material.

- **Structural Material (Passive Material)**

Metals, Polimer, Ceramic, Composite, Organic Materials, Anorganic Materials, Concrete Based Material

- **Intelligent Biomaterials dan Mimetic**

Human&Animal Bone, Bioceramic Material, Bioactive Material, Biomimetic Materials (Cluster of Science and Technology UGM).

Shape memory material termasuk dalam kategori *smart material* karena memiliki kemampuan sebagai aktuator, sensor atau *transducer*. Pengertian *smart material* secara sederhana adalah bahan yang memberikan respon dengan berubah bentuk sehingga memiliki aksi tertentu dalam suatu sistem. Respon tersebut dapat terjadi dengan merubah energi (panas, listrik, magnetik) menjadi gerak atau aksi tertentu pada bahan tersebut, sehingga *smart material* biasa disebut *active material* (Dirk Van De Mortel 2002).

Yang termasuk *smart material (active material)* antara lain :

- *Shape Memory Alloys (SMAs)*
- *Magnetosrictive Materials*
- *Piezoelectric Materials*

Tabel 2.1 Perbandingan dan perbedaan dari *smart technologies*

Active system	Shape Memory Alloys	Magnetostrictive Materials	Piezoelectric Materials
Driving force	Thermal field	Magnetic field	Electric field
Materials	Nitinol, CuAlNi, CuAlZnNi	Terfenol-D	PZT, PVDF
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> • Large force • High energy density • High material strength • High elasticity 	<ul style="list-style-type: none"> • Contact-less control via magnetic field • High frequencies ■ High temperatur range 	<ul style="list-style-type: none"> • High bandwidth • High frequencies • Low power actuation

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

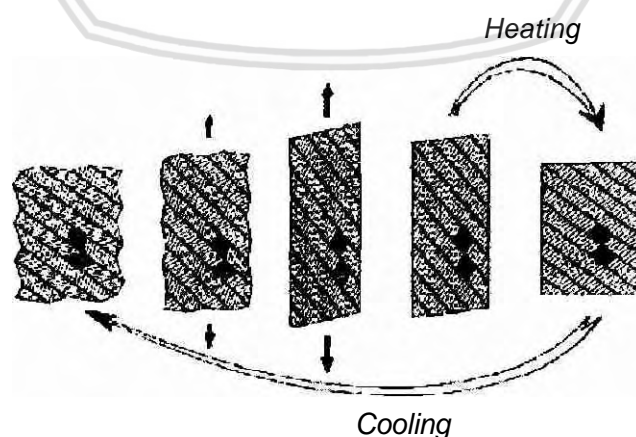
Limitations	<ul style="list-style-type: none"> • Low bandwidth • Low frequencies • High hysteresis • Limited temperature range 	<ul style="list-style-type: none"> • Generation of magnetic field equipment intensive • Limited strains • Low material tensile strength • Typically brittle materials 	<ul style="list-style-type: none"> • Limited strains • Auxiliary equipment needed • Low material tensile strength • Typically brittle materials • Limited temperature range
--------------------	--	---	--

Sumber : Dirk Van De Mortel, 2002:18

2.3 Shape Memory Alloys

2.3.1 Pengertian Shape Memory Alloys

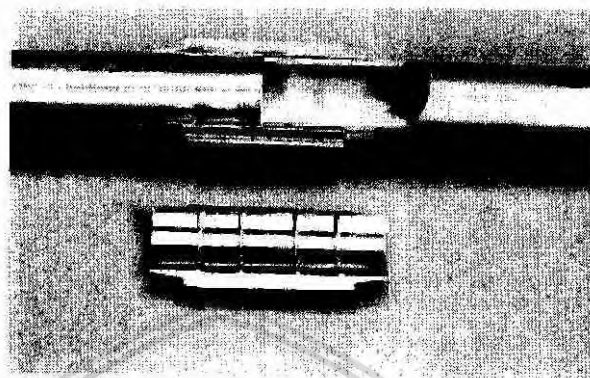
Shape Memory Alloys (SMAs) ditemukan pada tahun 1930 oleh William Buehler, dan pada tahun 1962 dilakukan penelitian lebih lanjut di *US Naval Ordnance Laboratory*. SMAs memiliki karakteristik yang sangat unik seperti kemampuan untuk mengingat suatu bentuk, super elastis, kemampuan meredam beban tekan serta keunikan pada hubungan non linier tegangan-regangan (Song et al. 2006). Bahan ini mempunyai kemampuan deformasi plastis *reversibel* mencapai 8%, dan kembali bentuk semula seperti sebelum terdeformasi dengan *stimulus* berupa temperatur (McCormick et al. 2006). Beberapa bahan yang termasuk SMAs antara lain paduan tembaga-seng-alumunium-nikel (CuZnAlNi), tembaga-alumunium-nikel (CuAlNi), dan nikel-titanium (NiTi).



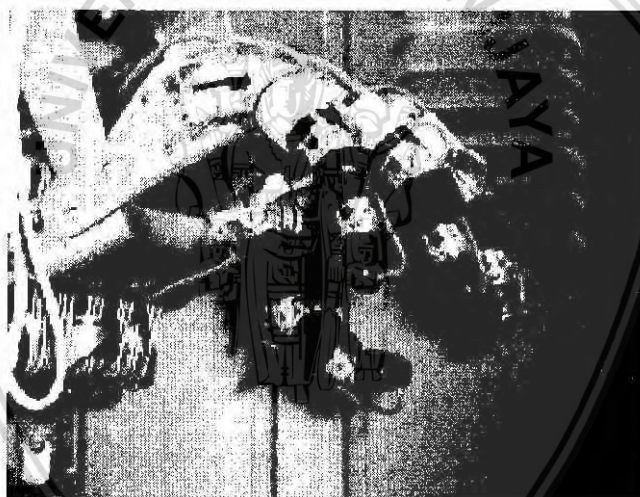
Gambar 2.2 . SMAs yang mengalami beban tarik

Sumber Brian Alan Davis, 2004 :70

Penggunaan *SMA*s secara luas untuk saat ini adalah pada bidang kedokteran dan teknik. Salah satu penggunaan *SMA*s dalam bidang kedokteran adalah sebagai penyaring gumpalan darah (*blood clot filter*), sedangkan aplikasinya dalam bidang teknik adalah untuk pembuatan *sealing plug* pada *fuel injector* mesin diesel, *cryofit hydraulic fluid coupling*, *fire check safety valve*, *actuated hand*.



Gambar 2.3 *Cryofit hydraulic fluid Coupling*
Sumber : Ming H. Wu and L.McD. Schetky, 2000:4

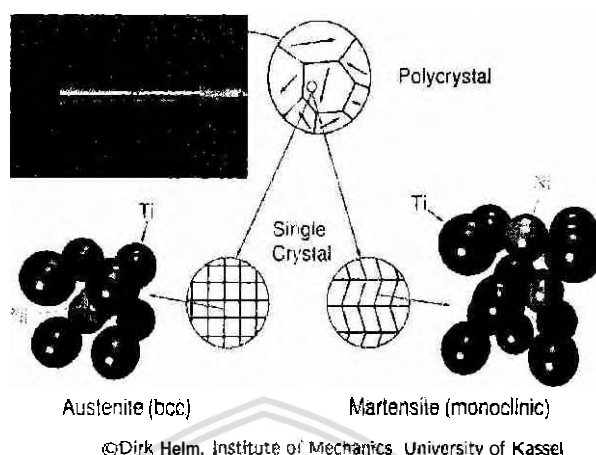


Gambar 2.4 : *Actuated Hand NiTi*
Sumber : Alan Tepe, 2005:2

2.3.2 Prinsip Kerja Shape Memory Alloys

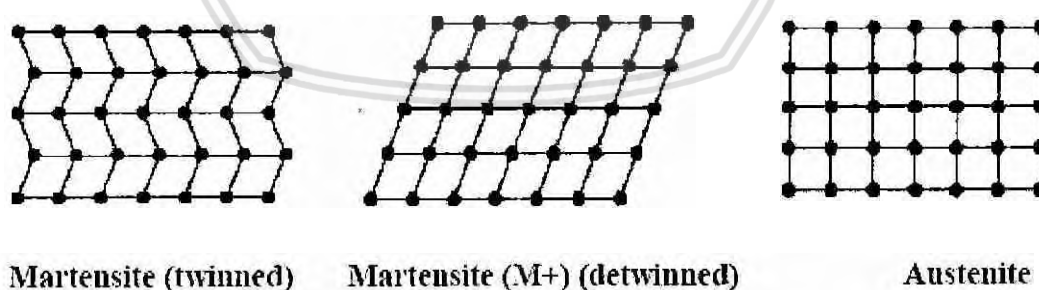
Pada *SMA*s, perubahan struktur molekul pada keadaan padat dari martensit menjadi austenit terjadi karena pengorganisasian ulang molekuler akibat pengaruh temperatur. Hal ini disebabkan atom-atom penyusun *SMA*s dapat bertransformasi tanpa

mengalami difusi dalam keadaan padat. Pada bahan ini perubahan temperatur 10°C telah cukup untuk menyebabkan terjadinya perubahan fase. Dua fase yang eksis pada *SMA*s martensit dan austenit ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 : Fase Martensit dan Austenit
Sumber : (Dirk H, 2007:1)

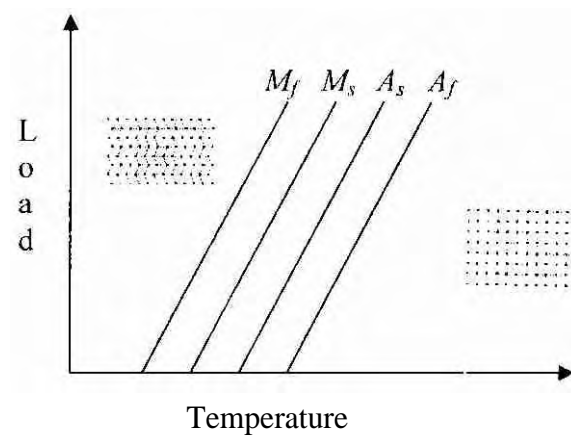
SMAs memiliki dua karakteristik yang unik yaitu *Superelasticity* (SE) dan *Shape Memory Effect* (SME). Fase Austenit dijadikan dasar untuk sifat SE pada *SMAs* dan fase martensit akan mengakibatkan SME. Austenit adalah fase yang lebih kuat dan stabil pada temperatur yang tinggi (McCormick et al. 2006). Austenit ini memiliki struktur kristal *body centered cubic* (BCC) sedangkan martensit tidak sekuat austenit, martensit ini lebih mudah terdeformasi, stabil pada suhu rendah, memiliki struktur kristal kembar. Pada fase martensit (*twinned*) struktur kristal adalah *monoclinic* dan saat terdeformasi berubah menjadi struktur kristal *Close Packed Hexagonal* (CPH). Adapun gambaran mikroskopik fase martensit dan austenit ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.6 *Microscopic Views* pada *SMAs*
Sumber : Brian Alan Davis, 2004 :70

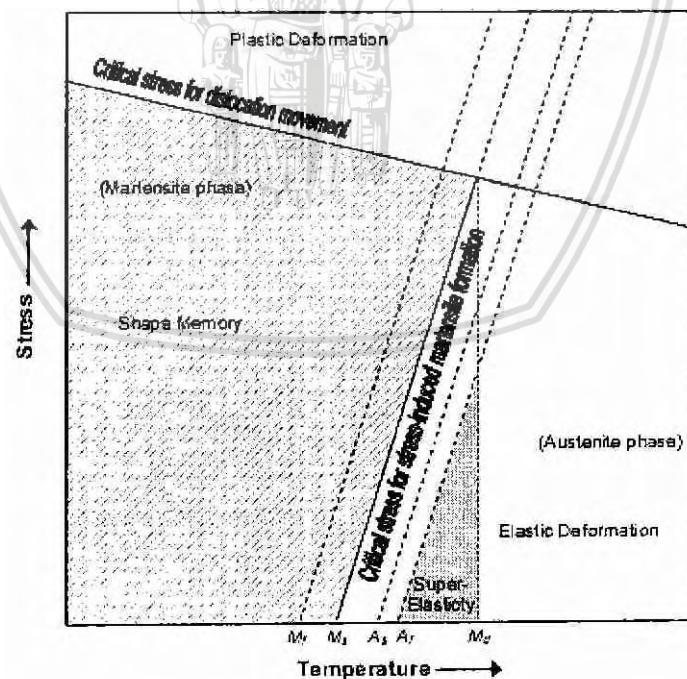
Suhu pada tiap fase dari awal sampai dengan selesainya pembentukan molekuler dari fase martensit sampai dengan fase austenit ditunjukkan dengan variabel M_f (*martensit finish*), M_s (*martensit start*), A , (*austenit start*), A_f (*austenit finish*) Banyaknya

beban yang diletakkan pada potongan dari *SMA*s meningkatkan nilai dari keempat variabel ini yang ditunjukkan pada Gambar 2.7



Gambar 2.7. Hubungan antara perubahan fase temperatur terhadap beban
Sumber : Texas A&M SMART Lab - <http://smart.tamu.edu/>

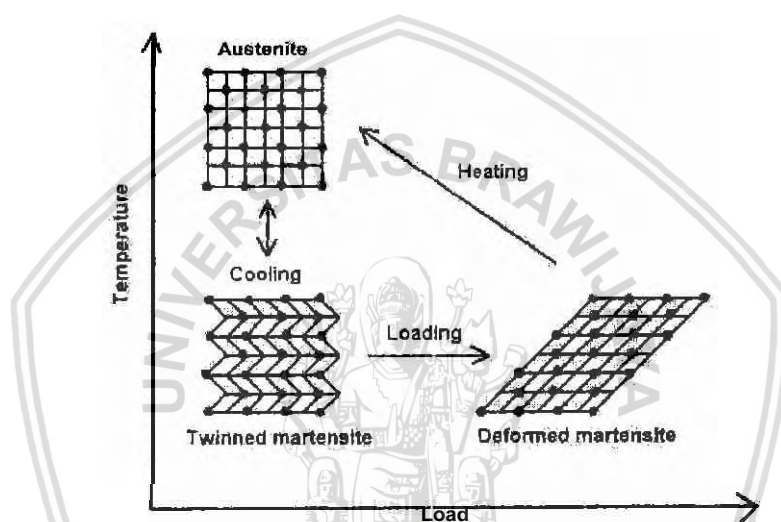
Seperti keterangan tersebut *Shape Memory Alloys* (SMAs) memiliki dua sifat yang unik yaitu *superelasticity* dan *SME*. Dua sifat tersebut memiliki wilayah kerja tertentu yang merupakan fungsi dari temperatur transformasi dan tegangan. Pemahaman mendasar dalam mendesain sebuah *SMAs* ini ditunjukkan pada grafik berikut :



Gambar 2.8 : Grafik Hubungan Temperatur Transformasi dan Tegangan
Sumber : Casper van der Eijk, et. al, 2004:2

2.3.3 Shape Memory Effect

SME terihat ketika temperatur dari *SMA*s didinginkan dibawah temperatur M_f . Pada tahap ini paduan tersusun oleh martensit yang secara mudah dapat terdeformasi. Setelah perubahan bentuk akibat deformasi, bentuk awal dari bahan akan didapat kembali dengan cara memberikan pemanasan di atas temperatur A_s . Perpindahan panas ke bahan adalah energi untuk menggerakkan pembentukan ulang molekular dari paduan, mirip pemanasan untuk pencairan es kedalam air. Setelah itu martensit yang terdeformasi akan bertransformasi menjadi *cubic austenit fase*, yang merupakan formasi bentuk awal dari bahan.

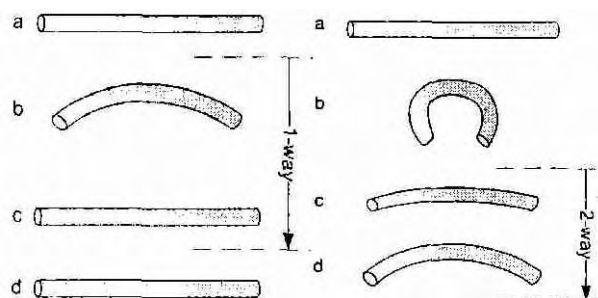


Gambar 2.9 : Diagram mikroskopik dari karakteristik *Shape Memory Effect*
 Sumber : OuluUniversity- <http://herkules oulu fil>

Klasifikasi *Shape Memory Effect*

SME secara umum dapat dikategorikan menjadi *One-Way Memory Effect* (OWME) dan *Two-Way Memory Effect* (TWME). Perbedaanya secara umum adalah pada jenis *memory* yang mampu diingat. Untuk *OWME memory* yang mampu diingat adalah satu jenis bentuk yang diberikan pada temperatur tinggi (di atas A_f). Sedangkan untuk *TWME* terdapat dua jenis *memory* yang mampu diingat, yaitu pada temperatur tinggi (di atas A_f) dan pada temperatur rendah (dibawah temperatur M_f). Berikut adalah gambar yang menunjukkan perbandingan antara OWME dan TWME.





Gambar 2 10 : *One-Way dan Two-Way Memory Effect*

Sumber : http://en.wikipedia.org/wiki/Shape_memory_alloy

Prosedur yang digunakan untuk terbentuk *OWME* dan *TWME* adalah sama yaitu .

- Dimulai dari martensit
- Diberikan deformasi baik *OWME* maupun *TWME*
- Pemanasan (*heating*)
- Pendinginan (*cooling*)

- ***One-Way Memory Effect***

One-Way Memory Effect (OWME) bahan mengalami deformasi permanen kemudian bila bahan atau spesimen dipanaskan diatas temperatur transformasi maka bahan akan kembali seperti sebelum terjadinya deformasi. Temperatur transformasi tergantung pada level tegangan dari fase martensit dan akan meningkatkan *Shape Memory Alloys* sesuai dengan peningkatan pada tegangan. Tegangan plastis naik menjadi diatas 8% bahkan 11%. Karena adanya sifat *OWME*, bahan dapat kernbali seperti sebelum terdeformasi dengan jalan memberikan temperatur di atas A_s . Meskipun deformasi plastis yang diberikan melebihi tegangan kritis (*critical stress*), deformasi tersebut sebenarnya masrh berada di bawah *true yield stress* dari *SMA*s sehingga tidak menyebabkan kerusakan pada bahan (Hornbogen, 1995).

- ***Two-Way Memory Effect***

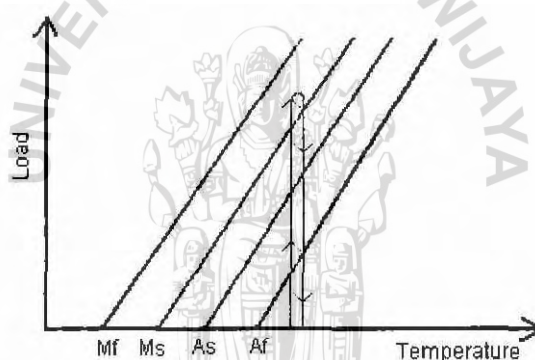
Two-Way Memory Effect (TWME) bisa didapatkan dengan cara memberikan suatu siklus *thermomechanical* kepada *SMA*s. Siklus *thermomechanical* ini akan menyebabkan bahan mengingat bentuk pada temperatur tinggi ataupun rendah. *SMA*s juga mengingat suatu bentuk antara (*intermediet*) sebagai tambahan terhadap bentuk selain pada temperatur tinggi dan rendah.

Pada *OWME* setelah menyelesaikan siklusnya dari deformasi dan pemanasan, bahan harus deformasi ulang untuk mengulangi *SME* nya. Sedangkan pada *TWME* hanya dengan memvariasikan temperatur dapat menyebabkan perubahan bentuk bahan

sesuai dengan *memory* yang telah diberikan *SMA*s yang telah diberi suatu ingatan bentuk pada literatur umum biasa disebut *material cerdas (smart material)*.

2.3.4 Super Elasticity

Super-elasticity (SE) terjadi pada *SMA*s ketika paduan telah selesai membentuk austenit (temperatur diatas A_f). Tidak seperti *SME*, *SE* terjadi tanpa perubahan temperatur. Beban terhadap *SMA*s akan bertambah setelah austenit bertransformasi menjadi martensit, proses ini ditunjukkan pada Gambar 2.11. Beban tersebut terserap oleh martensit yang lebih halus, dan kemudian dengan segera akan berkurang atau menurun saat martensit mulai bertransformasi menjadi austenit yang mana keadaan makronya bahan kembali seperti semula. Karena austenit adalah fase yang stabil pada temperatur lingkungan dengan kondisi tanpa pembebanan, maka bahan akan kembali seperti semula ketika tegangan atau beban yang bekerja dihilangkan. Pada karakteristik superelastis ini lebih dari 8% regangan pada bahan NiTi masih mampu kembali seperti semula



Gambar 2 11 : Diagram beban dan temperatur pada kondisi *Superelasticity*

Sumber : <http://www.sma.com/memshome.html>

2.4 Nikel dan Titanium

2.4.1 Nikel

Nikel adalah logam yang berwarna perak keabu-abuan biasa dipakai diindustri kimia, akumulator khusus dan untuk pelapisan logam. Tetapi pemakaian yang penting adalah sebagai paduan logam ferro dan non ferro. Nikel memiliki ketahanan panas dan ketahanan korosi yang sangat baik, tidak rusak oleh air kali atau air laut dan alkali. Tetapi bisa rusak oleh asam nitrat dan sedikit tahan korosi terhadap asam khlor dan asam sulfat. Nikel dapat diproses menjadi pelat tipis, batangan pendek, pipa dan kawat Nikel biasa juga dipakai untuk pembuatan tabung elektron dan penggunaan dalam industri makanan. Adapun karakteristik dari nikel murni adalah

Lambang	. Ni
Nomor atom	28
Kondisi standar pada 298 K	. padat
Berat jenis pada 298 K	. 8902 kgm ⁻³
Titik leleh	: 1726 K
Titik didih	3186 K
Konduktifitas listrik pada 298 K	1,46 x 10 ⁷ Ohm ⁻¹ m ⁻¹
Konduktifitas termal pada 300 K	90,7 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Bentuk Kristal	kubus pusat sisi (fcc)

2.4.2 Titanium

Titanium adalah logam yang sangat aktif. Titanium mempunyai ketahanan korosi sangat baik hampir serupa dengan baja tahan karat. Hal ini disebabkan titanium membentuk lapisan pelindung yang halus pada permukaannya sehingga dapat mencegah berlanjutnya korosi kedalam. Jika titanium dipanaskan diudara terjadi lapisan kulit TiO, Ti₂O dan TiO₂ sedang hidrogen yang terbentuk dari uap air diudara diserap oleh titanium. Selanjutnya O dan N, juga diserap oleh titanium, yang menyebabkan titanium menjadi keras. Oleh karena itu titanium menjadi getas jika dipanaskan pada atau diatas suhu 700 °C. Adapun karakteristik dari titanium murni adalah :

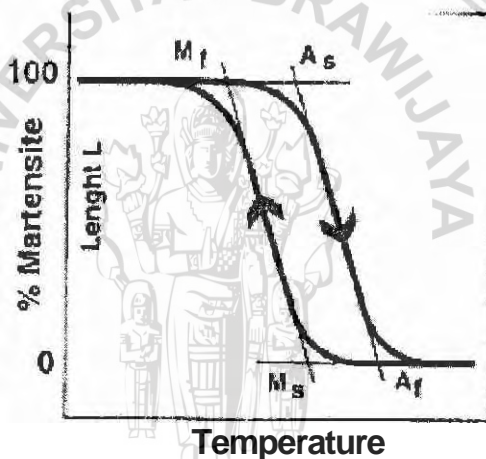
Lambang	. Ti
Nomor atom	. 22
Kondisi standar pada 298 K	. padat
Berat jenis	4506 kgm ⁻³
Titik leleh	: 1941K
Titik didih	3560 K
Konduktifitas listrik pada 293 K	: 0.420 μΩ·m
Konduktifitas termal pada 300 K	: 21.9 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Bentuk Kristal	:HCP<1158K<BCC

2.4.3 Paduan Nikel Titanium (NiTi)

Nikel Titanium (NiTi) adalah bahan paduan antara nikel dan titanium, dan memiliki nama dagang Nitinol. Paduan NiTi adalah sekitar 50% nikel dan 50% titanium. Karakteristik dari bahan NiTi antara lain kemampuan untuk kembali ke bentuk semula dapat dilakukan dengan pemanasan secara elektrik, stabil terhadap perubahan

temperatur, ketahanan korosi yang bagus, lebih mampu kembali ke bentuk semula dan *biocompatibility* yang tinggi. Transformasi temperatur pada bahan NiTi adalah antara -150°C sampai dengan 200°C dan akan turun bila ditambahkan besi atau cromium (Michalvasina 2006).

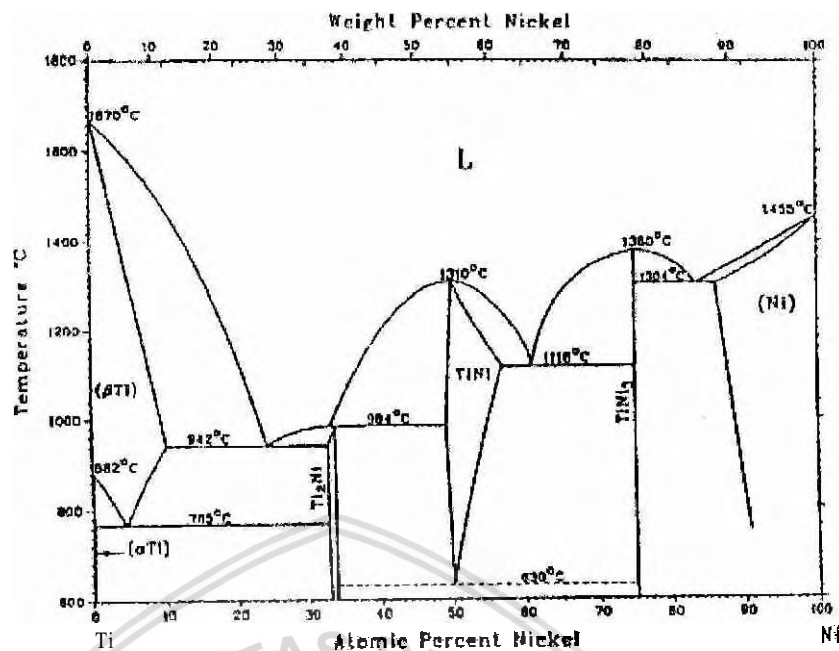
Jika tegangan diberikan pada bahan NiTi dan bahan NiTi mengalami deformasi (*deformed martensite*), dan bila secara makro bahan NiTi mengalami pertambahan panjang kurang lebih 10% maka bahan NiTi dapat kembali seperti semula serta mengeliminasi regangan yang terjadi dengan jalan penambahan temperatur diatas A_s sampai A_f (Dieter Stockel, 2000 :2). Proses ini terjadi karena adanya transformasi dari fase martensit menjadi fase austenit yang masing-masing memiliki struktur kristal tertentu Struktur kristal BCC pada austenit, *monoclinic* pada *twinned* martensit serta *CPH* pada martensit yang terdeformasi Sifat ini dapat ditunjukkan pada kurva *hysteresis*. Kurva *hysteresis* dari bahan NiTi ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 : Kurva *Hysteresis* NiTi
Sumber : EUROflex G. RAU GmbH 2000

Properti metalurgi dari bahan NiTi, memperbolehkan untuk merubah karakteristik mekanik dan temperatur dari fase transformasi. Perubahannya dapat dilakukan dengan penambahan unsur kimia yang lain atau dengan merubah rasio paduan pada campuran antara nikel dan titanium. Sebagai contoh, ketika prosentase nikel bertambah 1% pada paduan NiTi, maka suhu fase transformasi turun tetapi tegangan luluh pada austenit meningkat





Gambar 2.13 : Diagram Fase NiTi
Sumber : M.W.M. van der Wijst, 1992: 19

Proses produksi dan pembentukan dan bahan NiTi untuk fungsi tertentu sangatlah sulit karena titanium adalah elemen yang sangat reaktif. Karena peleburan harus dilakukan pada keadaan vakum atau *atmosfir inert*. *Electron beam melting* dan *vacuum induction melting* adalah metode yang dapat digunakan untuk proses peleburan. Untuk pembentukan bahan NiTi dalam bentuk ingot dapat dilakukan dengan pengerjaan panas dan pengerjaan dingin. Penggunaan las dan solder dengan suhu rendah ataupun tinggi pada proses pengerjaan sangatlah sulit dilakukan. Untuk membentuk suatu bentuk yang spesifik dapat dilakukan dengan *grinding*, *shearing* dan *punching* (Michal Vasina 2006)

Adapun karakteristik dari Nikel Titanium (NiTi), dalam penelitian ini yang digunakan adalah Nikel Titanium SM 495 *wire* yaitu :

➤ **Physical Properties**

Melting Point	2390 ⁰ F	1310 ⁰ C
Density	0.234 lb/in ³	6.5 g/cm ³
Electrical Resistivity	30 μohm-in	76 μohm-cm
Modulus of Elasticity	4-6 x 10 ⁶ psi	28-41 x 10 ³ MPa
Coefficient of Thermal Expansion	3,7 x 10 ⁻⁶ /°F	6.6 x 10 ⁻⁶ /°C

➤ **Mechanical Properties**

Ultimate Tensile Strength (UTS) (min) 160×10^3 psi 1100 MPa

Total Elongation (min) 10%

➤ **Shape Memory Properties**

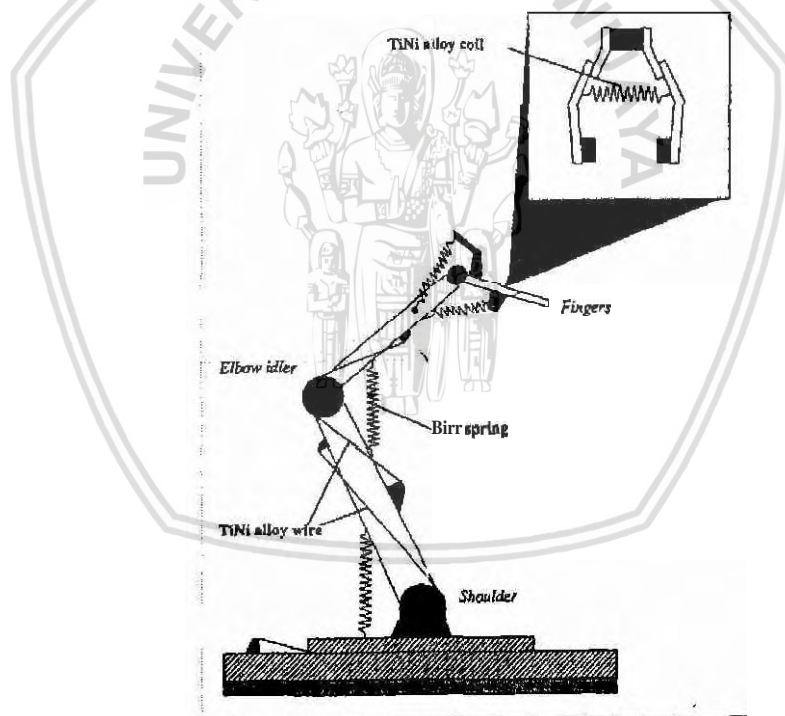
Loading Plateau Stress 15×10^3 psi 100 MPa

@ 3% strain (min)

Shape Memory Strain (max) 8.0%

Transformation Temperature (A_f) 140° F 60° C

Salah satu penggunaan bahan NiTi pada bidang manufaktur adalah sebagai lengan pada *micro-robot* yang bertugas untuk menangani komponen kecil pada industri elektronik yang membutuhkan *handling* dengan sentuhan yang halus, sehingga tidak merusak komponen. Pada lengan *micro-robot* ini digunakan dua jenis bahan NiTi, yaitu bentuk *wire* dan *spring* atau *coil* yang bekerja seperti otot *bisep* dan *trisep* pada lengan manusia.



Gambar 2.14 : *Micro-robot actuated by NiTi*

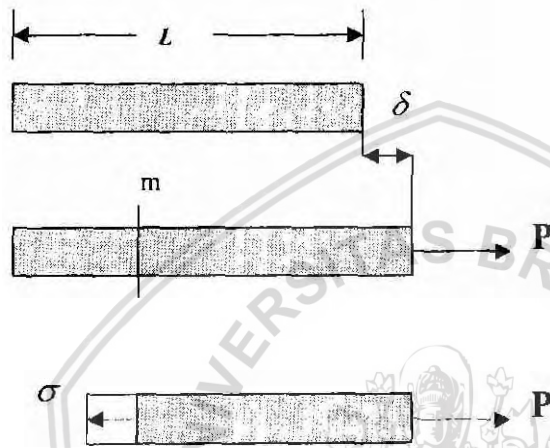
Sumber : Shivananda Pai Mizar, 2005:77



2.5 Perbandingan Diagram Tegangan Regangan Baja Lunak dan NiTi

2.5.1 Teori Tegangan dan Regangan

Konsep tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) dapat diilustrasikan dengan meninjau sebuah batang prismatik yang diberi beban dengan gaya aksial (P) pada ujungnya seperti ditunjukkan pada Gambar 7.15. Batang prismatik adalah sebuah batang lurus yang memiliki penampang yang sama pada keseluruhan panjangnya. Dalam ilustrasi ini, gaya-gaya aksial menimbulkan suatu tarikan sama rata pada batang, karena itu batang mengalami peregangannya (*tension*).



Gambar 2.15 : Batang prismatik yang mengalami tarik

Sumber : Gere&Timoshenko. 1963 :3

Untuk mengetahui tegangan-regangan internal yang ditimbulkan gaya-gaya aksial dalam batang, kita buat suatu pemotongan khayal pada irisan mn (Gambar 2.15). Irisan tegak lurus dari sumbu longitudinal batang atau biasa disebut irisan penampang (**cross section**) Beban tarik P bekerja pada ujung sebelah kanan sedangkan pada bagian kiri bekerja gaya-gaya yang menyatakan aksi dari bagian batang yang dipisahkan pada bagian yang tertinggal. Gaya-gaya ini terdistribusi secara terus menerus diseluruh penampang, yang analog dengan penyebaran kontinyu pada tekanan hidrostatik pada permukaan horisontal pada zat cair. Intensitas gaya atau gaya persatuan luas disebut tegangan (σ). Dengan menganggap bahwa tegangan terdistribusi merata pada seluruh penampang batang maka resultan sama dengan intensitas σ dikali luas penampang dari batang. Dari kesetimbangan benda pada Gambar 2.15 terlihat bahwa resultan ini besarnya sama dengan P yang diberikan tetapi arahnya berlawanan. Karena itu diperoleh:

$$\sigma = \frac{P}{A} \text{ (N/m}^2\text{)} \quad \text{(Popov E.P. 1996 : 8)} \quad (2.1)$$

Apabila batang ditarik oleh gaya P seperti pada Gambar 2.15, maka tegangan yang terjadi adalah tegangan tarik (*tensile stress*). Jika arahnya dibalik maka diperoleh tegangan tekan (*compressive stress*). Tegangan tarik berharga positif sedangkan tegangan tekan negatif. Karena tegangan bekerja dalam arah tegak lurus permukaan terpotong maka disebut tegangan normal.

Sebuah batang yang dibebani secara aksial akan mengalami perubahan panjang. Perubahan total dalam panjang ditunjukkan oleh huruf yunani δ , Gambar 2.15 ditunjukkan penambahan panjang karena beban tarik. Pemanjangan (*elongation*) ini merupakan kumulatif dari tarikan bahan pada seluruh panjang L dari batang. Pemanjangan per panjang satuan inilah yang biasa disebut regangan (ϵ).

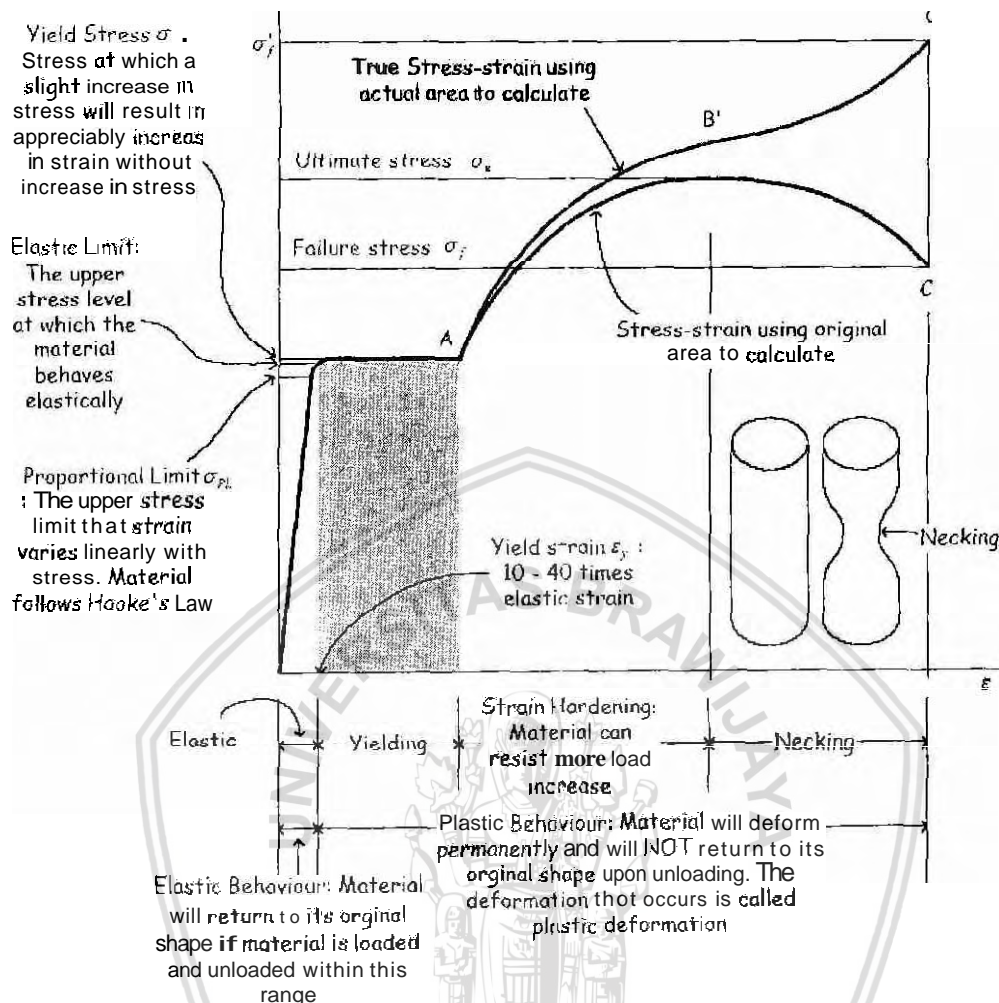
$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (\text{Gere\&Timoshenko, 1996 :5}) \quad (2.2)$$

Jika batang mengalami tarik maka regangannya disebut regangan tarik (*tensile strain*), sedangkan bila mengalami tekan maka regangannya disebut regangan tekan (*compressive strain*). Regangan tarik berharga positif sedangkan regangan tekan berharga negatif.

2.5.2. Prinsip Diagram Tegangan-Regangan

Diagram tegangan regangan adalah diagram yang menggambarkan hubungan antara tegangan dan regangan suatu bahan. Dalam diagram tegangan regangan ini skala ordinat menunjukkan tegangan dan skala absis menunjukkan regangan. Tegangan biasa dihitung dengan membagi gaya terpakai dengan luas bersangkutan sesungguhnya pada saat yang sama maka akan diperoleh tegangan sejati (*True Stress*) Plot tegangan sejati dengan regangan disebut tegangan regangan sejati, tetapi diagram seperti ini jarang digunakan dalam pengujian.

Secara eksperimen diterangkan bahwa diagram tegangan regangan sangat berbeda untuk bahan-bahan yang berbeda. Untuk bahan yang sama diagram ini belum tentu sama tergantung pada suhu pengujian yang dilakukan dan kecepatan pengujian.



Gambar 2.1 6 : Diagram tegangan-regangan baja lunak

Sumber <http://www.sci.engr-metalurgy.org>

Diagram tegangan regangan untuk baja lunak secara umum ditunjukkan seperti Gambar 2.16. Baja lunak biasa digunakan pada baja tuang untuk konstruksi. Pada titik nol sampai batas proporsional tegangan berbanding lurus dengan regangan membentuk garis lurus yang mempunyai kemiringan tertentu pada keadaan ini bahan dikatakan linier. Bila beban ditambahkan secara perlahan-lahan maka penambahan beban yang sama akan menghasilkan pertambahan panjang yang lebih besar dan setelah melewati titik elastis akan terjadi pertambahan beban tanpa pertambahan panjang, dikatakan beban mengalami luluh pada fase ini bahan dikatakan plastis sempurna. Keadaan ini hanya berlangsung beberapa saat, kemudian beban akan naik lagi untuk mendapat pertambahan panjang. Kemudian ini akan berlangsung terus menerus sampai akhirnya bahan patah.



Pada diagram tegangan regangan dikenal:

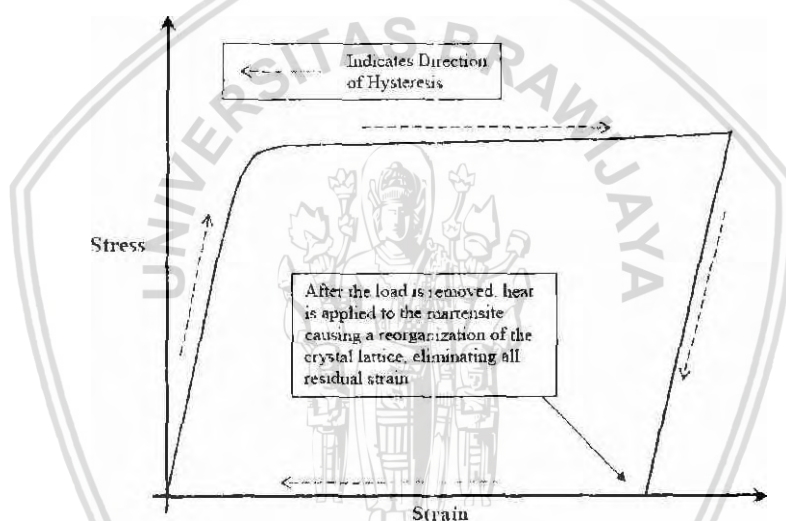
Titik proporsional yaitu titik keseimbangan antara tegangan dan regangan.

Titik luluh (*yield point*) yaitu tempat terjadinya penambahan regangan tanpa terjadinya penambahan beban.

Titik *Ultimate* yaitu tempat terjadinya tegangan tertinggi yang dicapai oleh bahan.

- Titik patah yaitu tempat bahan mengalami patah
- Daerah elastis yaitu tempat terjadinya deformasi elastis
- Daerah plastis yaitu tempat terjadinya deformasi plastis
- Daerah patah yaitu tempat terjadinya patahan.

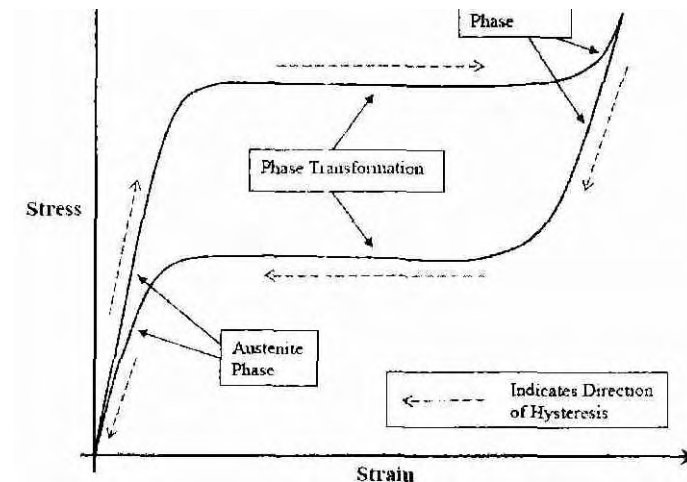
2.5.3. Diagram Tegangan-Regangan SMAs



Gambar 2.17 : Diagram tegangan-regangan dari *shape memory alloys* yang menunjukkan *shape memory effect*

Sumber Kristopher Baker et.al, 2006 :3

SMAs jenis Nikel Titanium yang digunakan untuk penelitian ini memiliki keunikan pada diagram tegangan-regangannya. Pada Gambar 2.17 ditunjukkan diagram tegangan-regangan dari sebuah SMAs yang menggambarkan karakteristik SME. Martensit akan bereaksi secara linear, sehingga tegangan yang stabil tercapai. Pada keadaan ini, bahan memulai deformasi plastis dan tegangan yang konstan terhentak. Jika beban dihilangkan, pengaruh regangan yang terjadi karena deformasi plastis akan hilang. Kemudian jika panas diberikan, bahan akan kembali mengalami pengorganisasian kisi kristal dan mengeliminasi semua regangan sisa (Kristopher Baker et.al.2006).



Gambar 2.18 : Diagram tegangan-regangan dari *superelastic shape memory alloys*
Sumber : Kristhoper Baker et al, 2006 :5

Ketika kristal struktur mengalami pergeseran antar fase, tegangan yang konstan akan terbentuk. Dengan peningkatan konstan dari tegangan, kristal struktur akan kembali stabil pada fase martensit. Pada kasus ini, kristal struktur dari martensit memulai bereaksi secara elastis. Jika beban dihilangkan sebelum martensit mengalami deformasi plastis, bahan akan mengalami *elastic martensitic* dengan jalan memberikan tegangan pertama dibawah tegangan konstan ketika regangan tereduksi. Kristal struktur mengalami pergeseran lagi dan membentuk tegangan konstan yang lain sehingga kembali kedalam fase austenit dan kembali ke bentuk semula tanpa ada regangan sisa (Kristhoper Baker et.al.2006).

2.6 Elastisitas dan Hukum Hooke

Hampir semua bahan teknik mempunyai sifat elastisitas (*elasticity*). Apabila gaya luar menghasilkan perubahan bentuk (*deformation*) tidak melebihi batas tertentu, maka perubahan bentuk hilang setelah gaya dilepas. Suatu bahan dikatakan elastis secara linear bila bahan berkelakuan secara elastis dan juga memperlihatkan suatu hubungan linier antara tegangan dan regangan. Sifat elastis ini sangat penting pada bidang rekayasa karena kebanyakan struktur dan mesin didesain untuk berfungsi pada tegangan yang rendah dan agar menghindari deformasi permanen ataupun deformasi plastis.

Hubungan linier antar komponen tegangan dan komponen regangan untuk suatu batang yang mengalami tekan ataupun tarik umumnya dikenal sebagai Hukum Hooke. Yang dinyatakan dalam persamaan .

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{Gere\&Timoshenko. 1996 :19}) \quad (2.3)$$

Keterangan : E = suatu konstanta pembanding yang biasa disebut modulus elastisitas dari bahan (Pa)

σ = tegangan (N/m^2)

ε = regangan

Modulus elastisitas adalah kemiringan dari diagram tegangan regangan dalam daerah elastis linier yang harganya tergantung pada bahan yang digunakan.

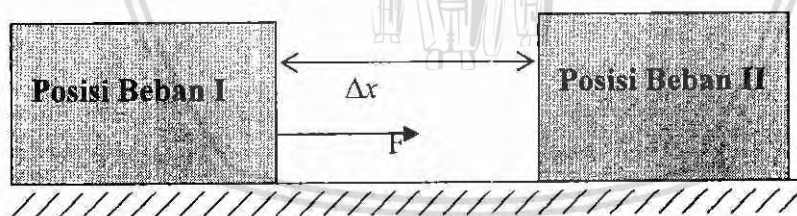
Dengan asumsi bahwa bahan tersebut adalah elastis linier, sehingga hukum Hooke berlaku ($\sigma = E\varepsilon$), maka pernyataan σ dan E dapat digabungkan untuk memberikan persamaan pemanjangan batang (*elongation*) sebagai berikut:

$$\delta = \frac{PL}{EA} \quad (\text{Gere \& Timoshenko, 1996: 49}) \quad (2.4)$$

2.7 Energi Mekanik

Energi seringkali disebut tenaga adalah kemampuan untuk melakukan suatu kerja. Energi dalam alam adalah suatu besaran yang kekal, yang dapat berubah dan suatu bentuk ke bentuk lain atau biasa disebut transformasi energi. Energi dapat berpindah dari satu sistem ke sistem lain. Perpindahan energi ini disebut transfer energi. Energi tidak dapat dimusnahkan hanya bisa berubah bentuk atau memindahkan energi.

Energi juga dapat dipindahkan dari suatu sistem ke sistem lain melalui gaya yang mengakibatkan pergeseran posisi suatu benda. Energi yang menyebabkan pergeseran posisi inilah yang biasa disebut energi mekanik.



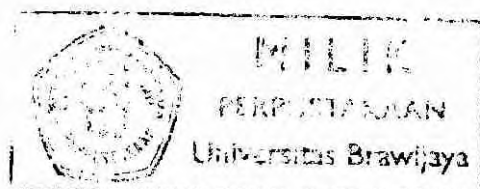
Bila gaya yang bekerja adalah F dan pergeseran posisi yang terjadi adalah x maka energi mekanik atau kerja yang terjadi dapat dirumuskan:

$$W = F \cdot A \cdot x \quad (\text{Sutrisno.1981:102}) \quad (2.5)$$

W = energi atau kerja mekanik (Nm)

F = gaya (N)

$A \cdot x$ = jarak (m)



2.8 Aktuator

Definisi atau pengertian aktuator antara lain:

- Aktuator adalah instrumen mekanik, pneumatik, hidrolik yang memberikan efek gerakan secara mekanik untuk merespon sebuah masukan atau *input* (www.power-technology.com).
- Aktuator adalah mekanisme yang menyebabkan sebuah peralatan dapat hidup, mati, diatur atau bergerak (www.pcmag.com).
- Aktuator adalah sebuah mekanisme yang menyebabkan suatu sistem bekerja secara otomatis (www.dictionary.die.net).
- Aktuator adalah alat yang berfungsi untuk mengaktifkan, lebih khususnya adalah alat yang berfungsi untuk menggerakkan atau menjalankan peralatan mekanik yang telah diintegrasikan atau dikoneksikan dengan komputer melalui sensor (www.answers.com)

Secara umum aktuator didefinisikan sebagai instrumen yang berfungsi mengubah satu bentuk energi (listrik, magnet, panas, tekanan) menjadi bentuk energi yang lain (gerak) untuk mengontrol sebuah sistem. Prinsip kerja aktuator yaitu menerima sinyal masukan untuk kemudian melakukan suatu aksi. Berikut adalah contoh aktuator yang sering digunakan, antara lain :

1. Motor listrik merubah energi listrik menjadi energi gerak (putaran).
2. Hidrolik atau Pneumatik Silinder: merubah energi tekan fluida menjadi energi gerak.
3. Relai . merubah energi listrik menjadi energi magnet kemudian dirubah lagi menjadi energi gerak.
4. Aktuator *SMA*s merubah *stimulus* yang diterima bahan *SMA*s berupa panas menjadi gerak, hal ini terjadi karena transformasi fase dari *deform martensit* menjadi *austenit* pada bahan *SMA*s.

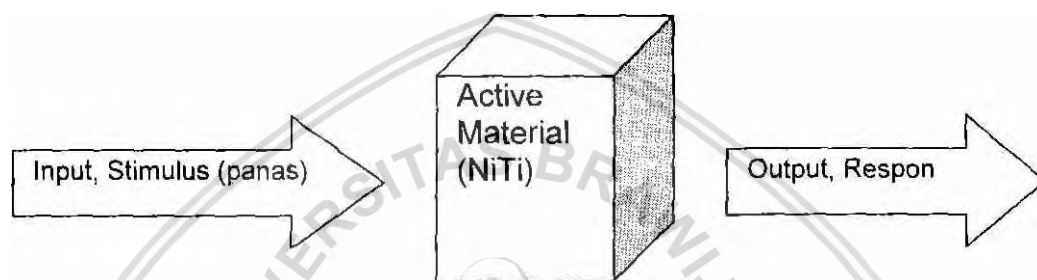
Aktuator *SMA*s secara umum memiliki karakteristik antara lain:

- Aktuator dengan desain sederhana tetapi memiliki output kerja yang tinggi tiap volume
- Memiliki kemampuan untuk pindah gerak (transformasi balik) yang tinggi dan pemulihan gaya yang baik
- Tegangan listrik untuk operasi yang menengah (dibawah 40 V)
- *Hysteresis* digunakan untuk penyerapan energi yang tinggi

- *SMA*s mampu mengingat bentukan awal (*parent shape*) yang baik
- Pengulangan *absorption* dengan harga tinggi dari energi regangan dan ketahanan lelah ketika dibebani tidak terjadi deformasi.
- Range regangan mencapai 70% (Vijay K Varadan, et.al. 2006:81)

Salah satu *SMA*s yang dapat difungsikan sebagai aktuator adalah NiTi *wire*. Bahan NiTi *wire* ini dipilih karena memiliki kemampuan transformasi balik (sifat *SME*) dan memberikan respon yang dinamis ketika mendapatkan perlakuan panas setelah proses deformasi.

Prinsip mengenai aktuator NiTi dapat diilustrasikan seperti Gambar 2.19.



Gambar 2 19 : Gambaran umum aktuator NiTi
Sumber : Dirk Van De Mortel, 2002 :2

Dalam penelitian tersebut didesain suatu sistem aktuator yang menggunakan NiTi *wire*. Sistem aktuator tersebut memanfaatkan sifat *SME* yang difungsikan sebagai penggerak *gripper*. *Gripper* tersebut bekerja bila bahan aktuator NiTi menerima *stimulus* temperatur diatas temperatur A_s . Bahan NiTi tersebut merespon temperatur dengan kembali ke bentuk semula.

2.9 Hipotesis

Pemberian variasi temperatur dan pembebanan pada bahan NiTi akan berpengaruh terhadap tranformasi balik bahan dan energi mekanik. Hal ini disebabkan bahan NiTi memiliki sifat *SME*, yang mana bahan dapat kembali ke bentuk mulanya setelah mengalami deformasi plastis. Kemampuan bahan NiTi yang mengalami pengulangan perlakuan akan diketahui ketahanannya terhadap transformasi balik bahan dan energi mekanik dengan analisis varian satu arah. Sifat *SME* tersebut terjadi akibat penambahan temperatur diatas temperatur A_s .

BAB III

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

Penelitian dan pengujian ini bertujuan untuk memperoleh model dinamik dari *LSA* yang memperoleh variasi pembebanan dan temperatur. Penggunaan SMA sebagai inovasi dan pengganti teknologi yang ada saat ini semakin gencar dikembangkan. Penelitian yang dilakukan terhadap SMA umumnya untuk mengetahui karakteristik bahan tersebut yang kemudian difungsikan sebagai aktuator, sensor. produk-produk dibidang keteknikan, kedokteran serta bidang-bidang yang dapat dipenuhi dengan karakteristik bahan tersebut.

Rerdasarkan uraian pada pendahuluan dan kajian pustaka telah diketahui bahwa fenomena *Shape Memory Effect(SME)* yang terjadi pada material-material paduan adalah begitu penting. Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

- Didapatkannya pemahaman yang sebenarnya terhadap karakteristik *SME* yang terjadi pada *Shape Memory Alloy(SMA)Nickel-Titanium*.
- Mengetahui kendala-kendala yang harus diatasi agar penggunaan *SMA Ni-Ti* dapat berfungsi dengan optimal
- Sebagai dasar untuk penelitian-penelitian lanjutan dan untuk pengembangan teknologi yang berbasis *Intelligence Material* khususnya *SMA* dari jenis *Nickel-Titanium*
- Sebagai informasi bagi peneliti lainnya maupun untuk bank data material-material baru yang dapat difungsikan sebagai aktuator dan sensor.
- Sebagai jalan untuk menuju kepada teknologi material dan teknologi dengan ketelitian tinggi khususnya di Indonesia
- Pemanfaatan bahan *SMA* pada bidang manufaktur dan kedokteran Banyak peralatan kedokteran modern saat ini terbuat dari bahan *SMA*

Disamping itu masih banyak lagi hal-hak yang bisa dilakukan serta dipenuhi dengan *Intelligence Material* ini yang saat ini belum dapat diterangkan.

BAB IV

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah penelitian eksperimental nyata (*true experimental research*), yang bertujuan untuk mengetahui besar energi mekanik dari bahan NiTi bila diberikan variasi temperatur dan pembebanan. Kajian literatur dari berbagai sumber baik dari jurnal hasil penelitian, buku-buku yang bersangkutan maupun sumber-sumber dari internet juga digunakan untuk menambah informasi yang diperlukan.

4.1 Variabel Yang Diteliti

4.1.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan sebelum penelitian, variabel bebas dapat diubah-ubah untuk mendapatkan hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat sehingga tujuan penelitian dapat tercapai. Dalam penelitian ini variabel bebas adalah variasi temperatur, yang digunakan:

- 30°C sampai dengan 61°C

Disamping itu variasi beban untuk mengetahui kemampuan bahan NiTi mengangkat beban tertentu untuk dasar rancangan aktuator sebesar: 250 gr, 300 gr dan 350 gr.

4.1.2 Variabel Terikat

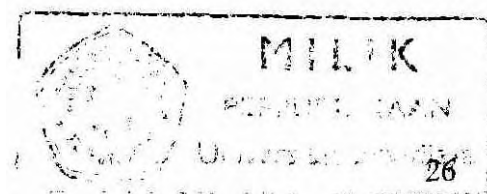
Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung pada variabel bebas. Dalam penelitian ini variabel terikat adalah:

- Perubahan panjang
- Energi mekanik

4.1.3 Konstanta

Konstanta adalah besaran yang harganya tetap. Dalam hal ini parameter yang menjadi besaran terkontrol adalah :

- Perpindahan panas secara konduksi dari sumber panas ke bahan NiTi SM 495 *wire*
- Arus dan tegangan dianggap konstan yaitu 18.5 V dan 6,33 A



4.2 Rancangan Penelitian

Model rancangan yang digunakan adalah model Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan melibatkan satu variabel yaitu temperatur dari suhu 30°C sampai dengan 61°C dengan pengulangan sebanyak 6 kali.

Tabel 4.1 Data Rancangan Pengujian Variasi Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi Dengan Beban 250 gr

Beban	Ulangan	Variasi Temperatur (°C)							
		30-33	34-37	38-41	42-45	46-49	50-53	54-57	58-61
250 gr	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								

Tabel 4.2 Data Rancangan Pengujian Variasi Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi Dengan Beban 300 gr

Beban	Ulangan	Variasi Temperatur (°C)							
		30-33	34-37	38-41	42-45	46-49	50-53	54-57	58-61
300 gr	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								

Tabel 4.3 Data Rancangan Pengujian Variasi Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi Dengan Beban 350 gr

Beban	Ulangan	Variasi Temperatur (°C)							
		30-33	34-37	38-41	42-45	46-49	50-53	54-57	58-61
350 gr	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								

4.3 Alat-alat Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Frame Penyangga.

Frame yang digunakan terbuat dari baja siku 1 x 1 inch berbentuk seperti rak dengan dimensi panjang, lebar, tinggi berturut-turut 800 x 600 x 1200 mm.

2. Pemegang spesimen

Pemegang spesimen yang digunakan terbuat dari aluminium paduan berdiameter 60 mm, dengan bagian tengah yang berlubang dengan diameter 40 mm dan lubang di sisi samping.

3. Keramik

Keramik mempunyai diameter 40 mm dan di dalamnya terdapat lubang tempat perletakan spesimen sebesar 2 mm.

4. Power Supply

Power Supply dengan trafo 5 A berfungsi sebagai sumber panas untuk melakukan penelitian.

5. Sensor dan peralatan pendukung lainnya

- *Thermocouple*

Thermocouple yang digunakan adalah tipe K. *Thermocouple* ini digunakan untuk mengubah besaran fisis berupa temperatur menjadi bentuk elektrik berupa tegangan. *Thermocouple* merupakan pasangan 2 logam yang dapat menerima sensor panas yaitu kromel (positif) dan alumel (negatif). Kromel tersusun dari 90%Ni dan 10%Cr, sedangkan Alumel tersusun dari 94%Ni, 3%Mn, 2%Al. Bila logam ini terkena panas maka akan terjadi gerak brown (gerak acak partikel) dan bila panas bertambah maka gerak makin acak sehingga terjadi polarisasi pada logam yang menyebabkan terjadinya gaya gerak listrik (voltase). Tegangan inilah yang akan dibaca ADC untuk dirubah menjadi sinyal digital.

Kalibrasi yang dilakukan adalah dengan menggunakan minyak yang dipanaskan. Tiap peningkatan suhu pada termometer ataupun *thermocouple* dilakukan pencatatan. Setelah itu dibuat persamaan dari kedua data yang ada, nilai nyata yang terbaca pada termometer disebut konstanta Y sedangkan nilai yang terbaca dikomputer oleh *thermocouple* disebut konstanta X. Untuk mendapatkan hasil kalibrasi yang baik persamaan tersebut sebisa mungkin dicari sampai mendapatkan nilai $R = 1$ atau mendekati 1.

- **Photosensor**

Photosensor yang digunakan adalah merk Sharp dengan spesifikasi GDP 12 P. Sensor ini menggunakan sinar *infra red* dan terdiri dari *transmitter* dan *receiver* yang berfungsi untuk mengukur besarnya perubahan panjang yang terjadi pada spesimen.

Kalibrasi yang dilakukan adalah dengan menggunakan kertas milimeter. Dimana tiap pergeseran posisi dilakukan pencatatan baik ukuran nyata ataupun ukuran yang terbaca oleh sensor. Setelah itu dibuat persamaan dari kedua data yang ada, nilai nyata yang terbaca dari kertas milimeter disebut konstanta Y sedangkan nilai yang terbaca di komputer oleh *photosensor* disebut konstanta X . Untuk mendapatkan hasil kalibrasi yang baik persamaan tersebut sebisa mungkin dicari sampai mendapatkan nilai $R = 1$ atau mendekati 1.

- **Rangkaian penguat OF-Amp**

Op-Amp (Operasional Amplifier) digunakan untuk menguatkan sinyal atau tegangan yang keluar dari sensor yang memiliki orde tegangan sangat kecil yaitu mVolt menjadi Volt

ADC 10 bit

Analogue-to-Digital Converter (ADC) adalah pengubah sinyal analog yang telah dikuatkan amplifier menjadi digital. Prinsipnya adalah mengubah mencuplik sinyal analog dari sensor kemudian mengubah amplitudo dari setiap cuplikan menjadi sandi digital. Keluarannya adalah sejumlah bit-bit digital paralel yang status logikanya menunjukkan amplitudo dari setiap cuplikan. Proses konversi dari analog ke digital dapat terjadi dengan bantuan *software*.

Komputer

Komputer digunakan untuk menerima, merekam dan memproses sinyal dari sensor setelah mengalami pengkonversian sinyal dari analog menjadi sinyal digital pada **ADC**. Komputer juga digunakan untuk menyimpan data dalam bentuk file.



4.4 Spesifikasi Bahan yang Digunakan

Bahan yang digunakan adalah paduan Nikel Titanium SM 495 *wire* dengan dimensi diameter dan panjang berturut-turut adalah 1 mm x 80 mm.

4.5 Instalasi Alat Penelitian

Instalasi penelitian beserta keterangannya ditunjukkan pada Gambar 4 7

4.6 Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Riset, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

4.7 Prosedur Penelitian

Persiapan meliputi :

1. Menyiapkan power supply untuk instalasi penelitian.
2. Melakukan *validasi* dan *kalibrasi* pada instalasi penelitian.
3. Memberikan *memory* baru pada bahan NiTi SM 495 *wire* sesuai desain

Untuk mendapatkan performa *shape memory* atau sifat *superelasticity* yang baik dapat dilakukan *heat treatment* dengan suhu pemanasan 450°C - 550°C (Scott M. Russell. 2001). Pemberian *memory* pada NiTi SM 495 *wire* pada penelitian ini akan dilakukan dengan membentuk bahan NiTi sesuai perencanaan, kemudian dimasukkan dapur diatas temperatur A_f (520°C selama 5 menit) dan dilakukan pendinginan cepat didalam air. Bahan NiTi tersebut akan menyimpan *memory* sesuai bentukan terakhir yang diberikan. Bahan NiTi yang di *heat treatment* ini jika dideformasi kemudian diberi temperatur diatas A , NiTi akan merespon kembali pada *memory* terakhir yang diberikan.

Pelaksanaan percobaan :

1. Memasang spesimen pada tempatnya.
2. Memasang beban pada ujung bebas spesimen.
3. Mengatur temperatur yang diinginkan.
4. Mengaktifkan instalasi penelitian.
5. Mengambil data perubahan panjang yang terjadi pada spesimen.
6. Pengolahan data dan pembahasan berupa pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik.
7. Penarikan kesimpulan.

4.8 Analis Statistik

Analisis statistik yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis varian satu arah, yaitu analisis yang digunakan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh variasi temperatur terhadap energi mekanik pada bahan Nikel Titanium SM 495 *wire* dengan pembebanan tertentu.

Semua kondisi perlakuan dianggap sama, sehingga perhitungan analisis variannya dengan K percobaan dengan anggapan bahwa hasil pengamatan dari 1 ke-n dianggap mempunyai nilai heterogen Berdasarkan data-data dapat ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 4 4 Analisis Statistik

Perlakuan Ulangan	Variasi Temperatur (°C)							
	30-33	34-37	38-41	42-45	46-49	50-53	54-57	58-61
1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_{16}	Y_{17}	Y_{18}
2	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	Y_{25}	Y_{26}	Y_{27}	Y_{28}
3	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	Y_{35}	Y_{36}	Y_{37}	Y_{38}
4	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}	Y_{45}	Y_{46}	Y_{47}	Y_{48}
5	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}	Y_{54}	Y_{55}	Y_{56}	Y_{57}	Y_{58}
6	Y_{61}	Y_{62}	Y_{63}	Y_{64}	Y_{65}	Y_{66}	Y_{67}	Y_{68}
Jumlah	ΣY_{1j}	ΣY_{2j}	ΣY_{3j}	ΣY_{4j}	ΣY_{5j}	ΣY_{6j}	ΣY_{7j}	ΣY_{8j}
Nilai rata-rata	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8

Keterangan . 1,2,3,4,5,6 = ulangan

Y_{ij} = Energi mekanik dari material pengulangan ke-i variasi temperatur-j

Dari data tersebut maka energi mekanik rata-rata yang disebut sebagai variabel terikat dianggap sebagai $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5, \mu_6, \mu_7, \mu_8$.

Dengan mengambil hipotesis :

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = \mu_7 = \mu_8$ (tidak ada pengaruh nyata antara variasi temperatur terhadap energi mekanik)

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5 \neq \mu_6 \neq \mu_7 \neq \mu_8$ (ada pengaruh nyata antara variasi temperatur terhadap energi mekanik)

Jika $F_{hitung} > F_{tabel}$ maka H_0 ditolak dan H_1 diterima, artinya ada pengaruh nyata akibat dari variasi temperatur. Berdasarkan tabel diatas dapat dihitung .

- Jumlah seluruh perlakuan

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Y_{ij}$$

- Jumlah kuadrat seluruh perlakuan

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2$$

- Faktor Koreksi (FK)

$$FK = \frac{\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Y_{ij} \right]^2}{ni.k}$$

dengan : ni = Jumlah pengamatan tiap kelompok

k = Jumlah atau banyaknya kelompok

- Jumlah Kuadrat Total (JK T)

$$JKT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - FK$$

- Jumlah Kuadrat Perlakuan (JKP)

$$JKP = \frac{\sum_{j=1}^k \left[\sum_{i=1}^n Y_{ij} \right]^2}{n} - FK$$

- Jumlah Kuadrat Galat (JKG)

$$JKG = JKT - JKP$$

- Kuadrat Tengah Perlakuan (KTP)

$$KTP = \frac{JKP}{k - 1}$$

- Kuadrat Tengah Galat (KTG)

$$KTG = \frac{JKG}{k(n - 1)}$$

Ada tidaknya pengaruh variasi temperatur terhadap variabel terikat dapat diuji melalui metode uji F_{hitung} dari rumusan :

$$F_{hitung} = \frac{KT_P}{KT_G}$$

Untuk melakukan uji analisis varian, dibuat tabel analisis varian satu arah sebagai berikut :

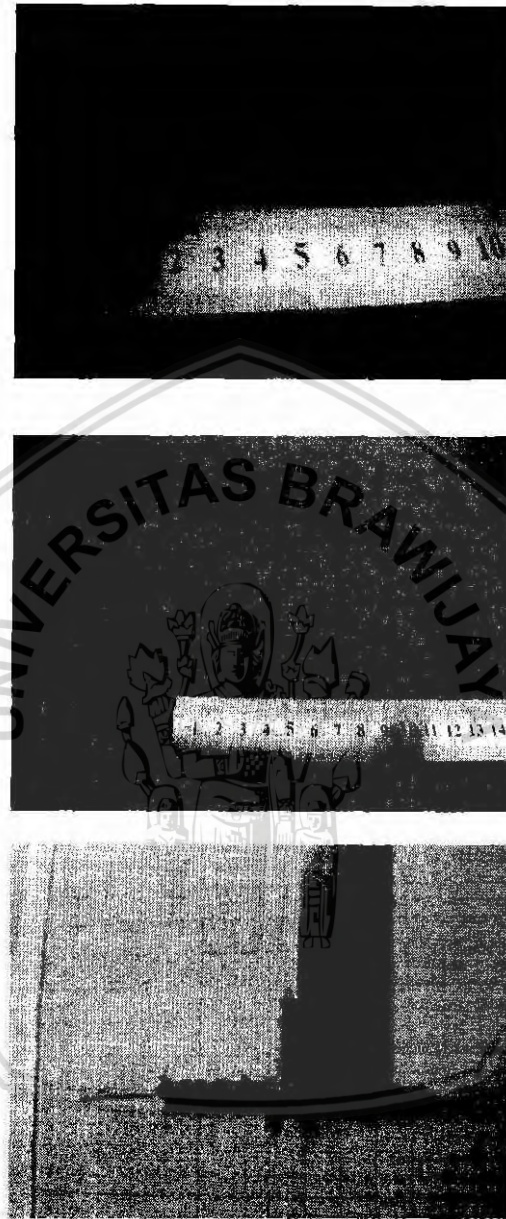
Tabel 4.5 Analisis Varian Satu Arah

Sumber Varian	Db	Jumlah kwadrat	Kwadrat rata-rata	F hitung
Perlakuan	k-1	JK _P	KT _P	$F_{hitung} = \frac{KT_P}{KT_G}$
Galat	n-k	JK _G	KT _G	
Total	n-1	JK _T		

4.9 Kegiatan dan Diagram Alir Penelitian

Sebelum penelitian dilakukan terlebih dulu dipersiapkan pengadaan bahan uji, Instrumentasi pengukuran serta alat bantu penelitian yang akan digunakan. Berikutnya dilakukan pembuatan aktuator dari bahan NiTi. Proses pembuatan spesimen uji yang sekaligus aktuator tersebut dilaksanakan dengan bantuan dapur listrik yang ada di Laboratorium Pengujian Material yang ada di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya. Pada pembuatan aktuator dilakukan proses pemberian memori pada bahan NiTi. Berikut adalah gambar-gambar yang menunjukkan proses pembuatan spesimen uji dari bahan NiTi.

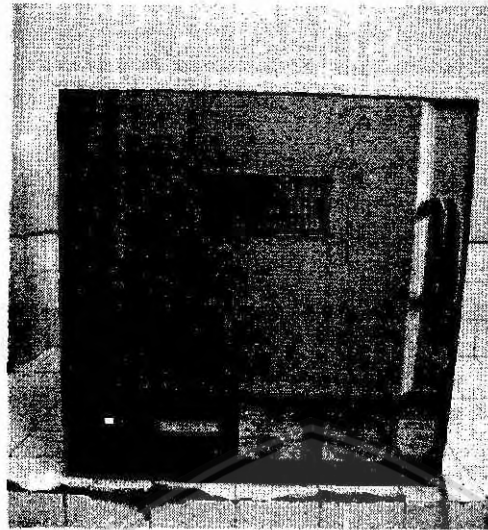




Gambar 4.1 Proses pembuatan spesimen uji dari bahan NiTi

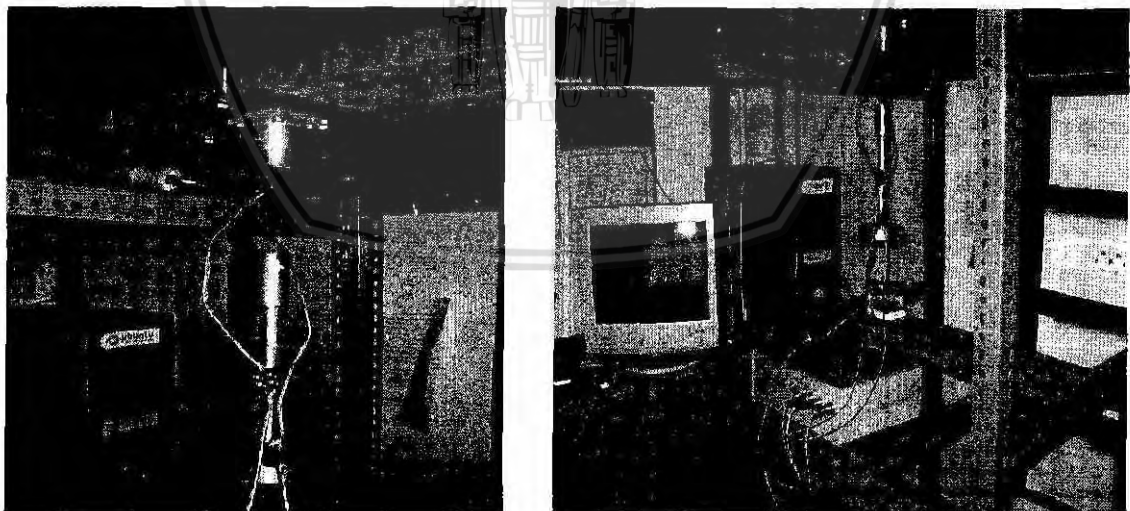
Setelah spesimen uji dihasilkan, selanjutnya dilakukan proses pemberian memori dengan jalan pemanasan dan *quenching*. Proses pemanasan dilakukan diatas temperatur 512 °C dan ditahan temperaturnya selama 6 menit. Hal ini dilakukan agar

material tidak dapat kembali ke bentuk awalnya. Berikut adalah gambar dapur listrik yang digunakan untuk proses pemberian memori tersebut.



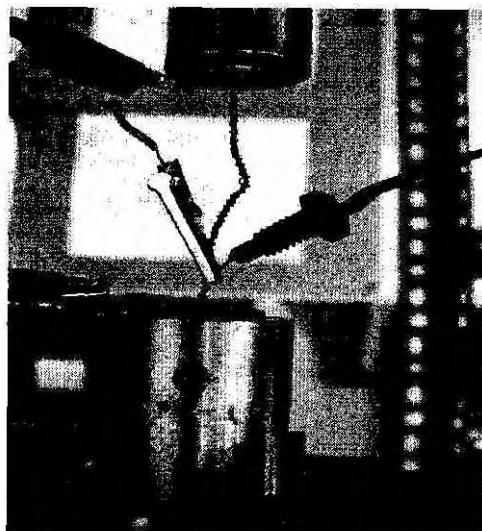
Gambar 4.2 Dapur Listrik untuk Proses Pemberian Memori Bahan NiTi SM 495

Setelah aktuator terbentuk, berikutnya dilaksanakan percobaan sesuai dengan prosedur rancangan penelitian yang telah dijelaskan sebelumnya, yaitu material diberi pembebanan dan diberi perlakuan panas. Gambar 4.3 berikut ini menunjukkan proses percobaan yang dilakukan terhadap aktuator dari bahan NiTi SM495.



Gambar 4.3 Proses percobaan pada aktuator dari bahan NiTi SM495

Proses pemberian stimulus berupa panas pada aktuator NiTi yang mendapat variasi pembebanan sebagaimana Gambar 4.4 berikut.



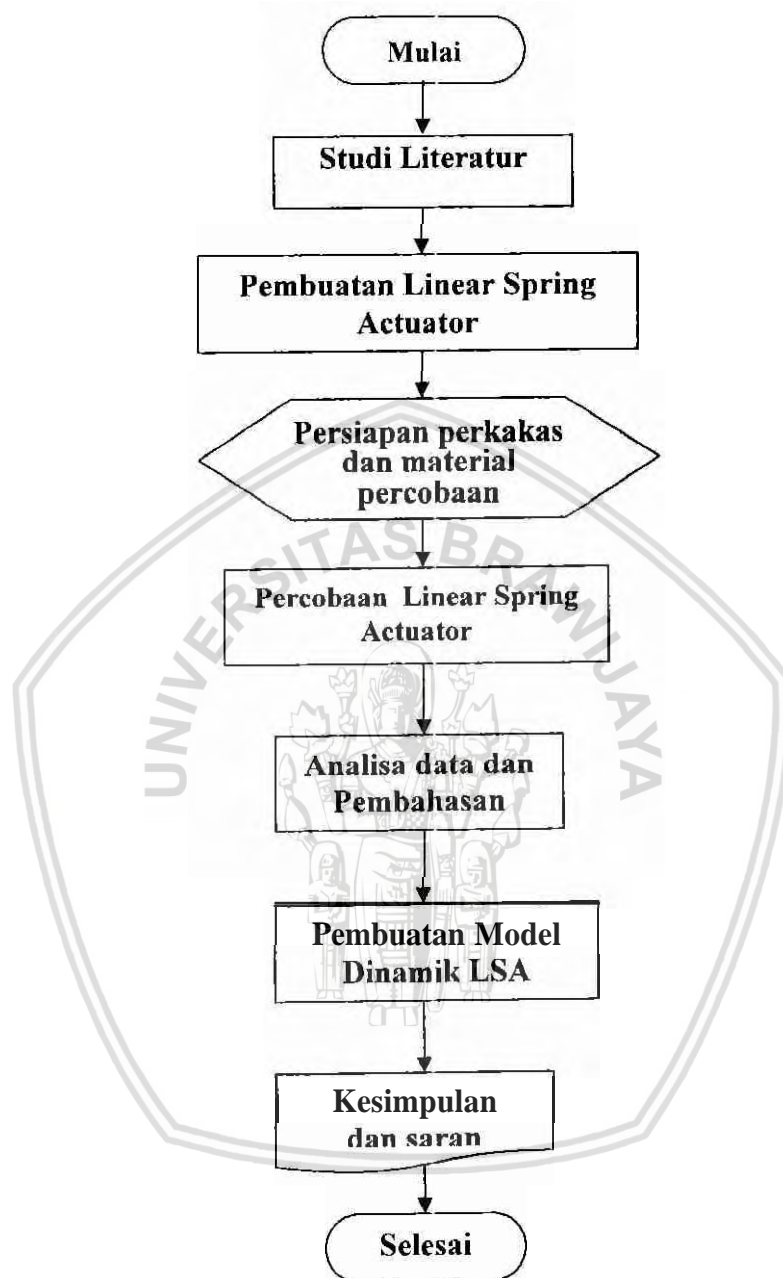
Gambar 4.4 Proses pemberian panas pada aktuator dari bahan NiTi

Akibat pemanasan diatas temperatur A_s akan menyebabkan aktuator kembali ke bentuk awal sehingga beban akan terangkat. Besar pergerakan aktuator saat mengangkat diukur dengan bantuan *Distance Photosensor* yang diletakkan sejajar dibawah beban sebagaimana Gambar 4.5 berikut

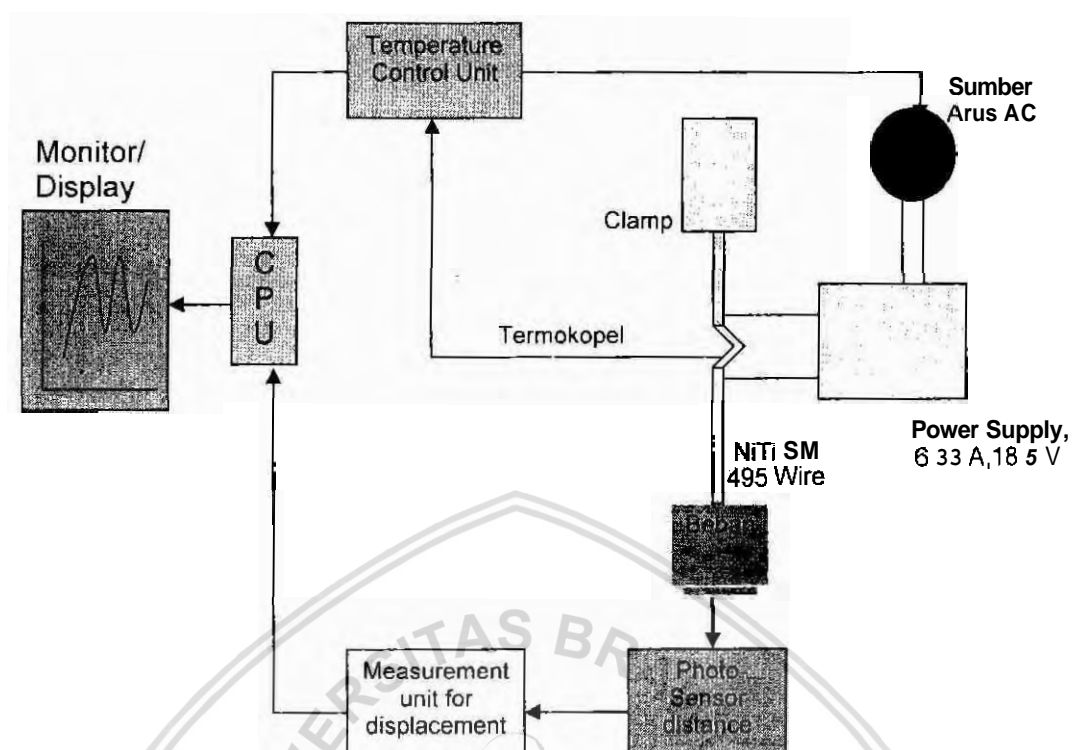


Gambar 4.5 Pengukuran pergerakan aktuator dengan *Distance Photosensor*

Kegiatan penelitian yang telah diuraikan tersebut dirangkum dalam diagram alir penelitian sebagaimana Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 4.7 Skematika Instalasi Pengujian Bahan Nikel Titanium SM 495 Wive

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Data Hasil Penelitian

Data hasil penelitian pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik bahan NiTi dengan variasi pembebanan, diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 5.1 Data hasil pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 250 gr

Beban	Ulangan	Variasi Temperatur (°C)							
		30-33	34-37	38-41	42-45	46-49	50-53	54-57	58-61
		Energi Mekanik (Nm.10 ⁻³)							
250 gr	1	6,36	16,81	17,68	17,76	16,78	16,50	16,00	15,89
	2	6,17	16,18	16,58	15,93	15,65	15,67	15,67	15,71
	3	6,55	15,72	15,71	15,64	15,71	15,75	15,59	15,57
	4	5,85	15,64	15,65	15,64	15,58	15,70	15,63	15,64
	5	5,78	15,68	15,62	15,67	15,65	15,58	15,75	15,71
	6	6,00	15,50	15,40	15,46	15,48	15,50	15,51	15,60

Tabel 5.2 Data hasil pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 300 gr

Beban	Ulangan	Variasi Temperatur (°C)							
		30-33	34-37	38-41	42-45	46-49	50-53	54-57	58-61
		Energi Mekanik (Nm.10 ⁻³)							
300 gr	1	5,66	15,63	15,60	15,60	15,60	15,60	15,60	15,62
	2	4,56	15,33	15,60	15,60	15,68	15,62	15,57	15,60
	3	3,61	15,15	15,52	15,40	15,64	15,60	15,60	15,60
	4	3,67	14,03	14,92	15,15	15,52	15,50	15,69	15,60
	5	4,14	13,80	14,06	14,89	15,24	15,30	15,30	15,34
	6	3,61	12,78	13,95	14,48	14,72	15,35	15,60	15,64

Tabel 5.3 Data hasil pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 350 gr

Ulangan		Variasi Temperatur (°C)							
		30-33	34-37	38-41	42-45	46-49	50-53	54-57	58-61
		Energi Mekanik (Nm.10 ⁻³)							
350 gr	1	5,43	13,79	14,21	14,12	14,07	14,05	14,08	14,00
	2	5,80	13,60	13,62	13,70	13,67	13,62	13,65	13,65
	3	5,01	13,14	13,60	13,60	13,65	13,70	13,59	13,65
	4	4,81	13,28	13,65	13,60	13,65	13,65	13,59	13,60
	5	3,78	12,45	13,67	13,6	13,65	13,59	13,68	13,65
	6	4,41	12,83	13,65	13,65	13,65	13,59	13,59	13,60

5.2 Analisis Varian

Hasil pengolahan data pengujian pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik dengan variasi pembebanan tersebut kemudian dilakukan analisis statistik dengan menggunakan analisis varian satu arah. Dengan analisis varian satu arah akan diketahui ada tidaknya pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik. Hipotesis yang digunakan dalam analisis statistik ini adalah:

$H_0^1: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$ (tidak ada pengaruh variasi penambahan temperatur terhadap energi mekanik)

H_1^1 : paling sedikit satu $\mu_i \neq 0$ (ada pengaruh variasi penambahan temperatur terhadap energi mekanik)

Disamping itu dilakukan analisis statistik juga terhadap pengaruh pengulangan terhadap energi mekanik dengan beban 250 gr, 300 gr dan 350 gr yang dapat menunjukkan kemampuan bahan NiTi bila diberikan penambahan temperatur dan beban secara berulang-ulang. Hipotesis yang digunakan dalam analisis statistik ini adalah:

$H_0^1: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$ (tidak ada pengaruh pengulangan terhadap energi mekanik)

H_1^1 : paling sedikit satu $\mu_i \neq 0$ (ada pengaruh pengulangan terhadap energi mekanik)

5.3 Analisis Statistik

5.3.1 Analisis Statistik Dengan Beban 250 gr

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 250 gr. Dari perhitungan statistik didapatkan tabel sebagai berikut:

Tabel 5.4 Analisis varian pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 250 gr

Anova *Single Factor*

250 gr

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>
<i>Column 1</i>	6	36,7313	6,121883
<i>Column 2</i>	6	95,5555	15,92592
<i>Column 3</i>	6	96,6735	16,11225
<i>Column 4</i>	6	96,12567	16,02095
<i>Column 5</i>	6	94,8603	15,81005
<i>Column 6</i>	6	94,711	15,78517
<i>Column 7</i>	6	94,17	15,695
<i>Column 8</i>	6	94,135	15,68917

ANOVA

Sumber Varian	Jumlah Kwadrat	Db	Kwadrat Rata-Rata	F Hitung	F Tabel
Perlakuan	499,0825	7	71,2975	253,7174	2,249024
Galat	11,24046	40	0,281011		
Total	510,323	47			

Dari Tabel 5 4 tersebut, dapat diperoleh kesimpulan:

$F_A \text{ hitung} > F_A \text{ tabel}$ maka H_0 ditolak dan H_1 diterima, ini berarti bahwa penambahan temperatur berpengaruh terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 250 gr.

Dari kesimpulan diatas terlihat bahwa penambahan temperatur pada bahan NiTi dengan beban 250 gr mempunyai pengaruh yang nyata terhadap energi mekanik dengan tingkat keyakinan 95%.

5.3.2 Analisis Statistik Dengan Beban 300 gr

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 300 gr. Dari perhitungan statistik didapatkan tabel sebagai berikut:

Tabel 5.5 Analisis varian pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 300 gr

Anova Single Factor

300 gr

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average
Column 1	6	25,275	4,2125
Column 2	6	86,7505	14,45842
Column 3	6	89,663	14,94383
Column 4	6	91,1361	15,18935
Column 5	6	92,4	15,4
Column 6	6	92,975	15,49583
Column 7	6	93,3689	15,56148
Column 8	6	93,4074	15,5679

ANOVA

Sumber	Jumlah	Kwadrat	F Hitung	F Tabel
Varian	Kwadrat	Db	Rata-Rata	
Perlakuan	643,4005	7	11,91436	260,1425
Galat	14,13292	40	0,353323	2,249024
Total	657,5335	47		

Dari Tabel 5.5 tersebut, diperoleh kesimpulan:

$F_{A \text{ hitung}} > F_{A \text{ tabel}}$ maka H_0 ditolak dan H_1 diterima, ini berarti bahwa penambahan temperatur berpengaruh terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 300 gr.

Dari kesimpulan tersebut terlihat bahwa penambahan temperatur pada bahan NiTi dengan beban 300 gr mempunyai pengaruh yang nyata terhadap energi mekanik dengan tingkat keyakinan 95%.

5.3.3 Analisis Statistik Dengan Beban 350 gr

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 350 gr. Dari perhitungan statistik didapatkan tabel sebagai berikut:

Tabel 5.6 Analisis varian pengaruh penambahan temperatur terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 350 gr

Anova: Single Factor

350 gr

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average
Column 1	6	29,269	4,878167
Column 2	6	79,1101	13,18502
Column 3	6	82,4228	13,73713
Column 4	6	82,275	13,7125
Column 5	6	82,343	13,72383
Column 6	6	82,219	13,70317
Column 7	6	82,199	13,69983
Column 8	6	82,15	13,69167

ANOVA

Sumber Varian	Jumlah Kwadrat	Db	Kwadrat Rata-Rata	F Hitung	F Tabel
Perlakuan	404,1214	7	57,73163	471,0177	2,249024
Galat	4,902714	40	0,122568		
Total	409,0241	47			

Dari Tabel 5.6 tersebut, diperoleh kesimpulan:

- I. $F_{A \text{ hitung}} > F_{A \text{ tabel}}$ maka H_0 ditolak dan H_1 diterima, ini berarti bahwa penambahan temperatur berpengaruh terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 350 gr

Dari kesimpulan diatas terlihat bahwa penambahan temperatur pada bahan NiTi dengan beban 350 gr mempunyai pengaruh yang nyata terhadap energi mekanik dengan tingkat keyakinan 95%

5.3.4 Analisis Statistik Pengaruh Pengulangan Perlakuan Pada Beban 250 gr

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pengulangan perlakuan terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 250 gr yang dapat menunjukkan kemampuan bahan NiTi terhadap transformasi balik dan energi mekanik bila diberikan penambahan temperatur dan beban secara berulang-ulang. Dari perhitungan statistik didapatkan tabel sebagai berikut:

Tabel 5.7 Analisis varian pengaruh pengulangan perlakuan pada paduan NiTi terhadap energi mekanik dengan beban 250 gr

Anova Single Factor
250 gr
repetition

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average
Row 1	8	123,8025	15,47531
Row 2	8	117,565	14,69563
Row 3	8	116,269	14,53363
Row 4	8	115,3703	14,42129
Row 5	8	115,4765	14,43456
Row 6	8	114,479	14,30988

ANOVA

Sumber Varian	Jumlah Kwadrat	Db	Kwadrat Rata-Rata	F Hitung	F Tabel
Perlakuan	7,288159	5	1,457632	0,121702	2,437694
Galat	503,0348	42	11,97702		
Total	510,323	47			

Dari Tabel 5.7 diperoleh kesimpulan:

$F_{A \text{ hitung}} < F_{A \text{ tabel}}$ maka H_0 diterima dan H_1 ditolak, ini berarti bahwa pengulangan perlakuan yang dilakukan tidak berpengaruh terhadap energi mekanik paduan NiTi pada beban 250 gr.

Dari kesimpulan diatas terlihat bahwa pengulangan perlakuan yang dilakukan pada bahan NiTi dengan beban 250 gr tidak mempunyai pengaruh yang nyata terhadap energi mekanik dengan tingkat keyakinan 95%

5.3.5 Analisis Statistik Pengaruh Pengulangan Perlakuan Pada Beban 300 gr

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pengulangan perlakuan terhadap energi mekanik dengan beban 300 gr yang dapat menunjukkan kemampuan bahan NiTi terhadap transformasi balik dan energi mekanik bila diberikan penamhahan temperatur dan beban secara berulang-ulang. Dari perhitungan statistik didapatkan tabel sebagai berikut:

Tabel 5.8 Analisis varian pengaruh pengulangan perlakuan pada paduan NiTi terhadap energi mekanik dengan beban 300 gr.

Anova Single Factor

300 gr

repetition

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average
Row 1	8	114,9214	14,36518
Row 2	8	113,5794	14,19743
Row 3	8	112,1371	14,01714
Row 4	8	110,0995	13,76244
Row 5	8	108,0865	13,51081
Row 6	8	106,152	13,269

ANOVA

Sumber Varian	Jumlah Kwadrat	Db	Kwadrat Rata-Rata	F Hitung	F Tabel
Perlakuan	6,993921	5	1,398784	0,090308	2.437694
Galat	650,5395	42	15,48904		
Total	657,5335	47			

Dari Tabel 5.8 tersebut diperoleh kesimpulan:

$F_{A \text{ hitung}} < F_{A \text{ tabel}}$ maka H_0 diterima dan H_1 ditolak, ini berarti bahwa pengulangan perlakuan yang dilakukan tidak berpengaruh terhadap energi mekanik paduan NiTi pada beban 300 gr

Dari kesimpulan diatas terlihat bahwa pengulangan perlakuan yang dilakukan pada bahan NiTi dengan beban 300 gr tidak mempunyai pengaruh yang nyata terhadap energi mekanik dengan tingkat keyakinan 95%.

5.3.6 Analisis Statistik Pengaruh Pengulangan Perlakuan Pada Beban 350 gr

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pengulangan perlakuan terhadap energi mekanik paduan NiTi dengan beban 350 gr yang dapat menunjukkan kemampuan bahan NiTi terhadap transformasi balik dan energi mekanik bila diberikan penambahan temperatur dan beban secara berulang-ulang. Dari perhitungan statistik didapatkan tabel sebagai berikut:

Tabel 5.9 Analisis varian pengaruh pengulangan perlakuan pada paduan NiTi terhadap energi mekanik dengan beban 350 gr

Anova Single Factor

350 repetition

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average
Row 1	8	103,7824	12,9728
Row 2	8	101,3293	12,66616
Row 3	8	99,9638	12,49548
Row 4	8	99,8435	12,48044
Row 5	8	98,079	12,25988
Row 6	8	98,9899	12,37374

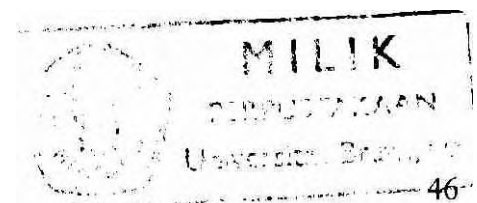
ANOVA

Sumber Varian	Jumlah Kwadrat	Db	Kwadrat Rata-Rata	F Hitung	F Tabel
Perlakuan	2,518914	5	0,503783	0,052051	2,437694
Galat	406,5052	42	9,678696		
Total	409,0241	47			

Dari Tabel 5.9 tersebut diperoleh kesimpulan:

$F_{A \text{ hitung}} < F_{A \text{ tabel}}$ maka H_0^1 diterima dan H_1^1 ditolak, ini berarti bahwa pengulangan perlakuan yang dilakukan tidak berpengaruh terhadap energi mekanik paduan NiTi pada beban 350 gr.

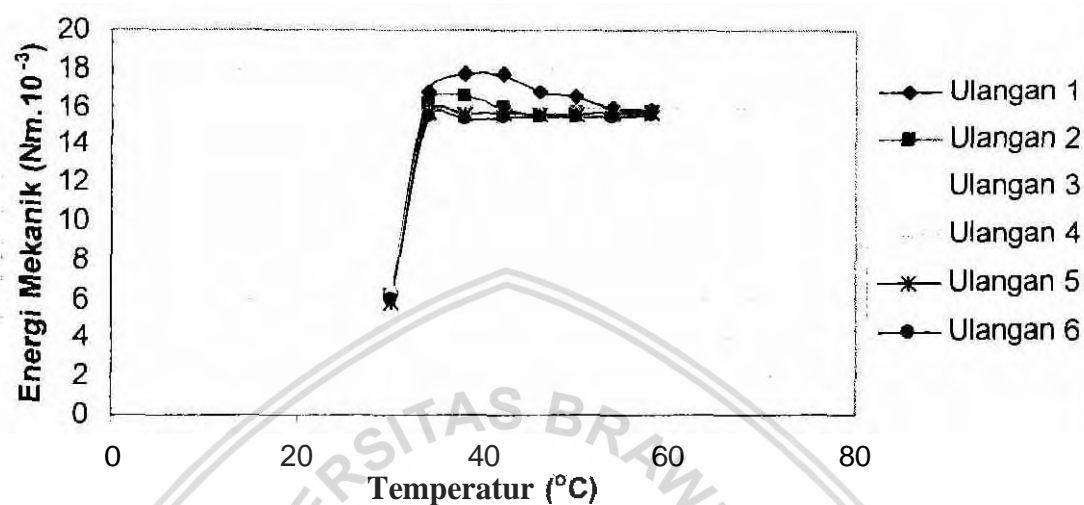
Dari kesimpulan tersebut terlihat bahwa pengulangan perlakuan yang dilakukan pada bahan NiTi dengan beban 350 gr tidak mempunyai pengaruh yang nyata terhadap energi mekanik dengan tingkat keyakinan 95%



5.4 Pembahasan

5.4.1 Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi (250gr)

Pengaruh Temperatur Terhadap Energi Mekanik Dengan Beban 250 gr (18.5V;6.33A)



Gambar 5.1 Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi dengan Beban 250 gr.

Pada *SMA*s, perubahan struktur molekul pada keadaan padat terjadi karena adanya pengorganisasian ulang molekuler akibat pengaruh temperatur. Pengaruh pemberian *stimulus* berupa panas di atas temperatur A_s , pada bahan NiTi akan mengakibatkan perubahan fase martensit menjadi austenit. Pada penelitian tersebut sifat SME pada bahan NiTi dimanfaatkan. *SME* terjadi ketika temperatur *SMA*s didinginkan di bawah temperatur M_s . Pada tahap ini bahan tersusun dari fase martensit yang mudah terdeformasi. Setelah deformasi, bentuk awal dari material akan didapat kembali dengan cara memberikan pemanasan di atas temperatur A_s . Perpindahan panas ke material adalah energi untuk menggerakkan pembentukan ulang molekuler dari bahan. Hal ini serupa dengan pemanasan untuk pencairan es. Setelah itu martensit yang terdeformasi akan bertransformasi menjadi *cubic austenit fase*, yang merupakan formasi bentuk awal dari material.

Bahan NiTi diberi ingatan dan bentuk tertentu yang akan bekerja seperti pegas. Kemudian bahan NiTi yang sudah terbentuk tadi diberi beban sehingga akan mengalami tarikan yang menyebabkan bahan NiTi mengalami *deformed martensit*. Pemberian *stimulus* berupa panas di atas temperatur A_s , akan mengakibatkan beban dapat

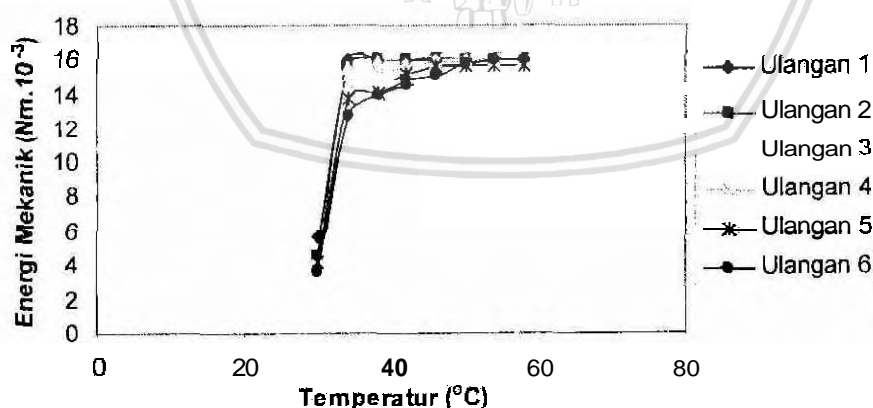
terangkat dengan jarak tertentu karena bahan NiTi mengalami pembentukan ulang molekuler dan kembali menuju fase austenit yang telah diberi ingatan dan bentuk sebelumnya.

Gambar 5.1 menunjukkan hubungan energi mekanik dengan temperatur bahan NiTi dengan beban 250 gr. Pada percobaan tersebut dilakukan pengulangan sebanyak 6 kali. Dari grafik terlihat bahwa energi mekanik tertinggi diperoleh pada pengulangan pertama yaitu 17.76 Nmm. Kemudian berturut-turut pengulangan kedua sampai dengan keenam. Adapun nilai energi mekanik dari pengulangan kedua sampai dengan keenam adalah 16.58 Nmm, 15.729 Nmm, 15.708 Nmm, 15.75 Nmm, 15.607 Nmm.

Karakteristik dari keenam pengulangan yang dilakukan adalah dengan bertambahnya temperatur maka energi mekanik yang terjadi akan semakin meningkat dan setelah mencapai titik tertentu akan konstan. Hal ini disebabkan bahan NiTi yang diberikan panas tidak mampu lagi mengangkat beban melainkan hanya menahan beban pada posisi tersebut. Keenam pengulangan yang dilakukan memiliki kecenderungan temperatur terhadap energi mekanik yang sama sehingga bisa dikatakan bahan NiTi memiliki kemampuan pengulangan yang baik terhadap pengaruh penambahan temperatur dan beban 250 gr.

5.4.2 Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi (300gr)

Pengaruh Temperatur Terhadap Energi Mekanik Dengan Beban 300 gr (18.5V; 6.33A)



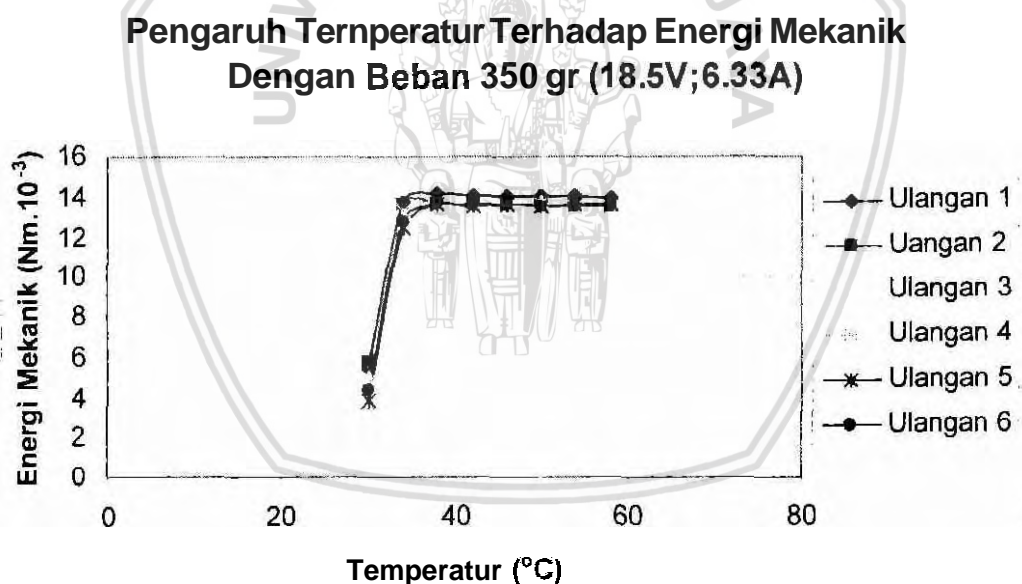
Gambar 5.2 Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi dengan Beban 300 gr

Gambar 5.2 menunjukkan hubungan energi mekanik dengan temperatur bahan NiTi dengan beban 300 gr. Pada percobaan tersebut dilakukan pengulangan sebanyak 6 kali. Dari grafik terlihat bahwa energi mekanik pada pengulangan pertama energi

mekanik tertinggi yaitu 15.5675Nmm Kemudian berturut-turut pengulangan kedua sampai dengan keenam. Adapun nilai energi mekanik dari pengulangan kedua sampai dengan keenam adalah 15.68 Nmm, 15.61 Nmm, 15.692 Nmm, 15.343 Nmm, 15.643 Nmm

Karakteristik dari keenam pengulangan yang dilakukan adalah dengan bertambahnya temperatur maka energi mekanik yang terjadi akan semakin meningkat dan setelah mencapai titik tertentu akan konstan hal ini disebabkan bahan NiTi yang diberikan panas tidak mampu lagi mengangkat beban melainkan hanya menahan beban pada posisi tersebut. Keenam pengulangan yang dilakukan memiliki kecenderungan temperatur terhadap energi mekanik yang sama sehingga bisa dikatakan bahan NiTi memiliki kemampuan pengulangan yang baik terhadap pengaruh penambahan temperatur dan beban 300 gr.

5.4.3 Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi (350gr)



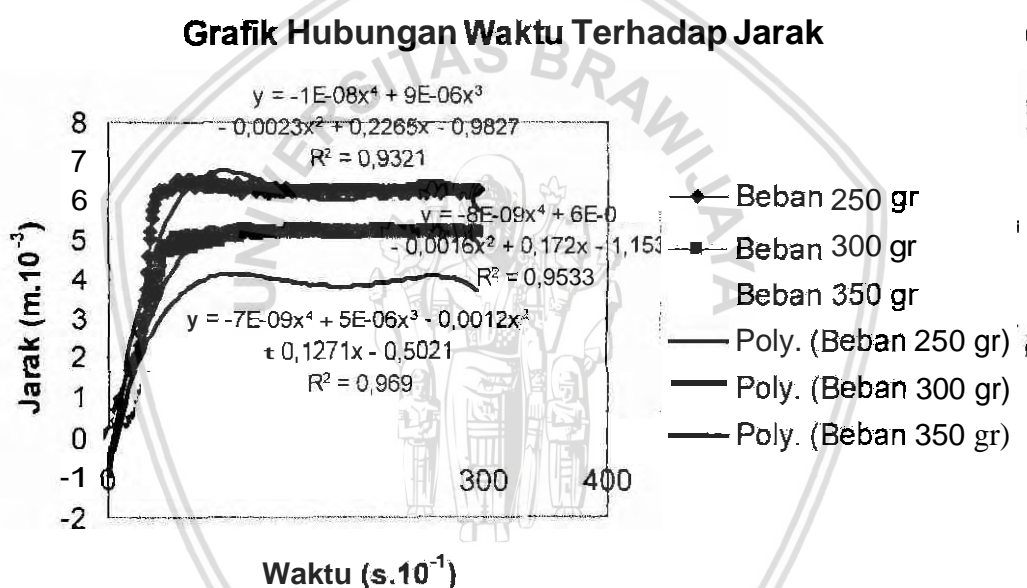
Gambar 5.3 Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi Dengan Beban 350 gr

Gambar 5.3 menunjukkan hubungan energi mekanik dengan temperatur bahan NiTi dengan beban 350 gr. Pada percobaan tersebut dilakukan pengulangan sebanyak 6 kali. Dari grafik terlihat bahwa energi mekanik pada pengulangan pertama memiliki energi mekanik tertinggi 14.218 Nmm dibandingkan kelima pengulangan yang lain.

Pada pengulangan kedua sampai dengan keenam memiliki energi mekanik tertinggi berturut-turut: 13 7 Nmm, 13 708 Nmm, 13.65 Nmm, 13.68 Nmm, 13 65Nmm.

Karakteristik dari keenam pengulangan yang dilakukan adalah dengan bertambahnya temperatur maka energi mekanik yang terjadi akan semakin meningkat dan setelah mencapai titik tertentu akan konstan hal ini disebabkan bahan NiTi yang diberikan panas tidak mampu lagi mengangkat beban melainkan hanya menahan beban pada posisi tersebut. Keenam pengulangan yang dilakukan memiliki kecenderungan temperatur terhadap energi mekanik yang sama sehingga bisa dikatakan bahan NiTi memiliki kemampuan pengulangan yang baik terhadap pengaruh penambahan temperatur dan beban 350 gr.

5.4.4 Grafik Hubungan Waktu Terhadap Jarak (Average)

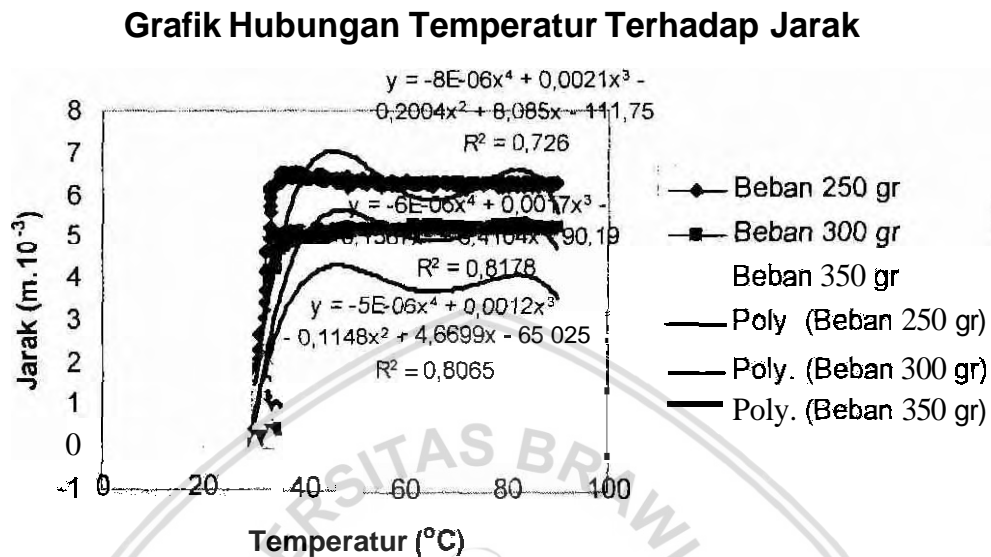


Gambar 5.4 Hubungan Waktu Terhadap Perubahan Jarak

Gambar 5 4 menunjukkan hubungan antara waktu dengan perubahan jarak. Pada beban 250 gr nilai perubahan jarak paling tinggi yaitu 6 55mm dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapainya adalah 5.5 detik. Pada beban 300 gr nilai perubahan jarak paling tinggi yaitu 5.24 mm tetapi sebenarnya mulai stabil pada jarak 5.1 mm dengan waktu 6.3 detik. Pada beban 350 gr nilai perubahan jarak paling tinggi yaitu 3.98 mm tetapi sebenarnya mulai stabil pada jarak 3.91 mm dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapainya adalah 5 4 detik. Dari Gambar 4 4 terlihat semakin berat beban maka jarak dari beban yang diangkat akan semakin kecil. Kemampuan transformasi balik yang merata dari beban 250 gr, 300 gr dan 350 gr bila dilihat dari waktu yang

dibutuhkan untuk mencapai jarak yang stabil yaitu sekitar 5-6 detik. Nilai perubahan jarak ini akan berpengaruh terhadap besarnya energi mekanik, dengan semakin besarnya perubahan jarak maka energi mekanik akan semakin besar.

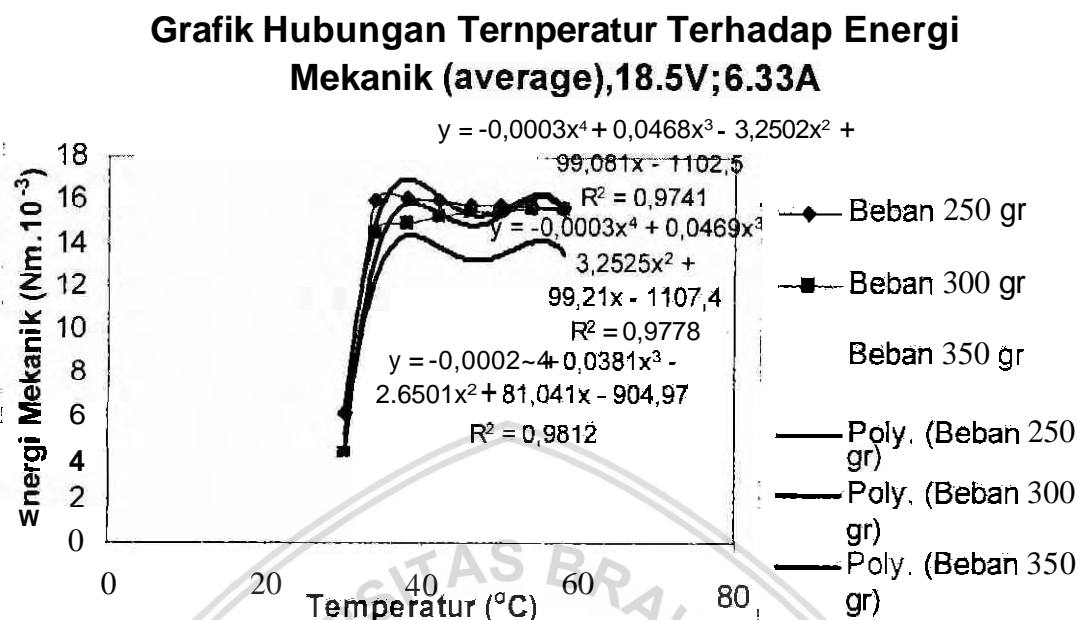
5.3.5 Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Jarak



Gambar 5.5 Hubungan Perubahan Temperatur Terhadap Perubahan Jarak

Gambar 5.5 menunjukkan hubungan perubahan temperatur terhadap perubahan jarak. Pada graiik tersebut terlihat bahwa dengan bertambahnya temperatur maka akan terjadi perubahan jarak pula dan akan konstan bila telah mencapai jarak tertentu karena energi panas yang bekerja hanya mampu menahan beban pada bahan NiTi tersebut. Pada beban 250 gr untuk mencapai perubahan jarak maksimal 6.55 mm energi panas yang dihasilkan dari arus AC 18.5 V; 6,33 A adalah range temperatur 30°C-36°C. Pada beban 300 gr untuk mencapai perubahan jarak yang stabil 5.1 mm energi panas yang dihasilkan dari arus AC 18,5 V; 6.33 A adalah range temperatur 30°C-37°C. Dan pada beban 350 gr untuk mencapai perubahan jarak yang stabil 3.91 mm energi panas yang dihasilkan dari arus AC 18,5 V; 6,33 A adalah range temperatur 30°C-35°C. Range temperatur ini menunjukkan range yang mana material NiTi memberikan respon optimal terhadap tansformasi balik material NiTi.

5.3.6 Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Paduan NiTi (250gr, 300gr, 350gr)



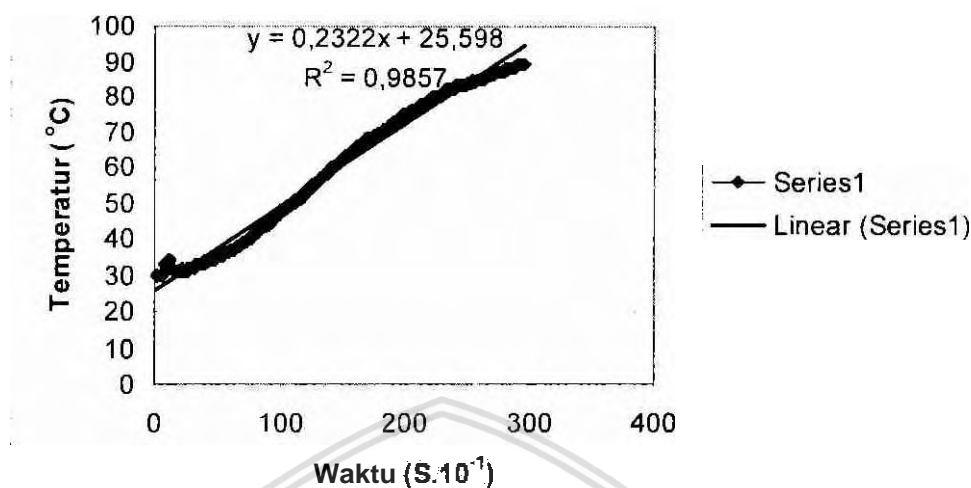
Gambar 5.6 Hubungan Temperatur Terhadap Energi Mekanik Dengan Beban 250 gr, 300 gr, 350 gr (Average)

Gambar 4.6 menunjukkan hubungan temperatur dengan energi mekanik bahan NiTi dengan variasi beban. Pada grafik tersebut terlihat bahwa energi mekanik dengan beban 250 gr memiliki harga tertinggi 16 11225 Nmm. Setelah mencapai titik maksimal energi mekanik konstan hal ini disebabkan bahan NiTi sudah tidak mampu mengangkat beban yang diberikan atau hanya mampu menahan beban saja. Sedangkan pada beban 300 gr dan 350 gr berturut-turut memiliki energi mekanik tertinggi 15.5679 Nmm dan 13.73713 Nmm kemudian energi mekanik konstan.

Energi mekanik pada beban 250 gr memiliki nilai rata-rata tertinggi yaitu 14 645 Nmm diikuti 300 gr yaitu 13.853 Nmm dan 350 gr yaitu 12.541 Nmm. Hal ini disebabkan karena pada saat bahan NiTi diberi beban 250 gr memiliki kemampuan transformasi balik paling tinggi dibandingkan pada beban 300 gr dan 350 gr yang ditunjukkan dengan besarnya perpindahan yang terjadi pada beban. Dari rumusan, energi mekanik dipengaruhi oleh gaya dan besarnya perpindahan yang terjadi. Yang mana energi mekanik sebanding dengan besarnya perpindahan yang terjadi tersebut sehingga semakin jauh beban dipindah atau diangkat maka semakin tinggi energi mekaniknya.

5.3.7 Grafik Hubungan Waktu Terhadap Temperatur

Grafik Hubungan Waktu Terhadap Temperatur



Gambar 5.7 Hubungan Laju Perubahan Temperatur Terhadap Waktu

Hubungan antara waktu dengan temperatur berdasarkan Gambar 5.7, mengikuti persamaan $y = 0.2322x + 25.598$ dengan nilai $R^2 = 0.9857$. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur (y) mengalami kenaikan rata-rata sebesar 0.2322 untuk tiap perubahan waktu (x). Nilai $R^2 = 0.9857$ menunjukkan bahwa peningkatan nilai temperatur disebabkan oleh pemberian panas dengan waktu tertentu sebesar 98,57% dan 1.43% adalah nilai kesalahan yang terjadi pada pengukuran temperatur tersebut.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari data hasil pengolahan dan pembahasan dapat dibuat kesimpulan sebagai berikut

- Perubahan temperatur berpengaruh terhadap energi mekanik bahan NiTi SM495 *wire*, dengan bertambahnya temperatur diatas *Austenit Start* menyebabkan bertambahnya energi mekanik.
- Variasi beban menyebabkan perubahan energi mekanik bahan NiTi ketika bahan NiTi diberikan penambahan temperatur diatas *Austenit Start*. Dengan bertambahnya beban menyebabkan turunya energi mekanik.
- Pegulangan perlakuan dengan beban yang sama sebanyak 6 kali pada paduan NiTi tidak berpengaruh signifikan terhadap energi mekaniknya.
- Bahan NiTi SM495 *wire* dapat dijadikan salah satu solusi sebagai aktuator karena memiliki kemampuan mengubah satu bentuk energi (panas) menjadi bentuk energi yang lain (gerak) dan memiliki kemampuan mengangkat atau menahan beban yang bekerja pada bahan NiTi tersebut.

6.2 Saran

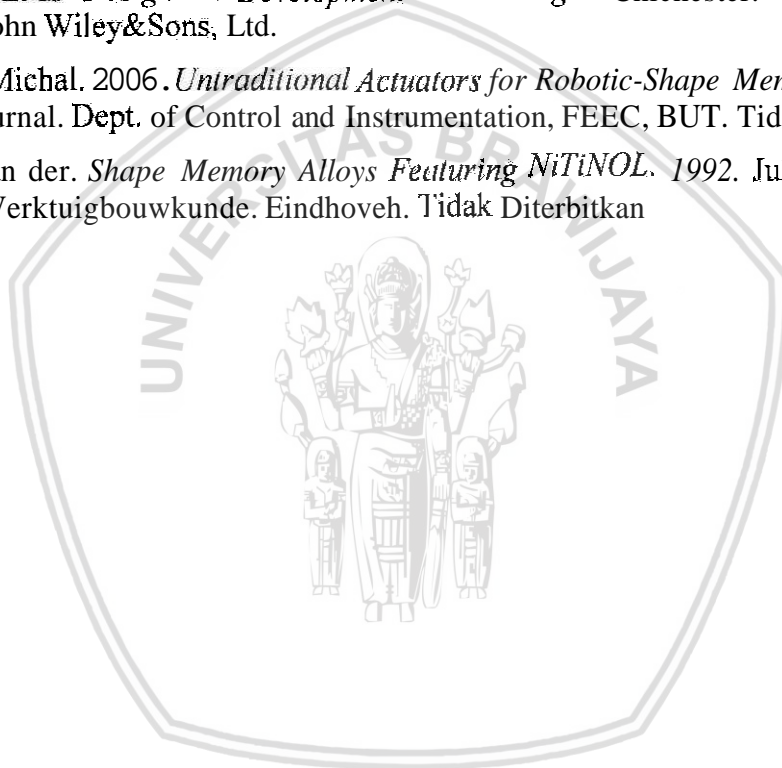
- Perlu dilakukan pengamatan dalam skala mikroskopik (kondisi martensit-austenit).
- Perlu dilakukan pengamatan terhadap besarnya energi panas yang bekerja pada bahan NiTi SM495 *wire* yang menyebabkan perubahan fase dari martensit menjadi austenit.
- Perlu dilakukan pengamatan terhadap besarnya *internal energy* yang dimiliki bahan NiTi SM495 *wire*.
- Penggunaan distance *sensor* yang memiliki ketelitian *sensing* lebih tinggi.
- Pada proses pengambilan data diusahakan agar kondisi udara sekitar *steady* sehingga kesalahan data pengukuran dapat ditekan seminimal mungkin.



DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2001. *Shape Memory Alloys*. <http://www.smalmems.com/sma.html>
- Anonim. 2003. *Stress Strain Diagram*. <http://www.sci.engr-metallurgy.org>
- Anonim. 2005. *Nitinol And Other Shape Memory Alloys*.
<http://cambridgeuniv.com/Nitinol.html>.
- Anonim. 2006. *Smart Material, Cluster of Science and Technology UGM*.
<http://www.ugm.ac.id>.
- Anonim. 2007. *Actuator*. <http://www.wikipedia.com/actuator.htm>
- Anonim. 2007. *Rased Actuator*. http://www.answer.com/actuator_based.htm
- Anonim. 2007. *Actuator*. <http://www.power-technologi.com>
- Anonim. 2007. *Actuator*. <http://www.dictionary.die.net>
- Anonim. 2007. *Shape Memory Alloys*.
http://www.wikipedia.com/shape_memory_alloy.htm
- Anonim. 2007. *Shape Memory Alloys and Their Applications*
<http://www.yahoo.com/sma2.html>
- Baker. Kristopher, N. Marker, G. Saylor. 2006. *Investigation of Nitinol Shape Memory Alloys for Structural Engineering Applications. Research Experience*. Department of Civil and Environmental Engineering University Of Cincinnati. Ohio. Tidak Diterbitkan.
- Davis. B A 2004 *Investigaion Of The Thermomechanical Response Of Shape Memory Alloy Hyhrrd Composite Beams*. Thesis. North Carolina State University. Tidak Diterbitkan.
- Dirk H. 2007. Institute Of Mechanics, University Kassel, Germany.
- Hifni, M. 1992 *Analisis Varian & Penerapannya*. Malang : Kopma Press, Malang
- Mizar, S.P. 2005. *Thermomechanical characterization of NiTiNOL and NiTiNOL based structures using ACES methodology. Disertation*. Worcester Polytechnic Institute Tidak Diterbitkan.
- Popov.E P 1996. *Mekanika Teknik* Jakarta : Erlangga
- Russell S.M. 2001. *Nitinol Melting And Fubrication*. Jurnal. Fremont : SMST-2000 Conference Proceedings.
- Suprpto, J. 1992. *Statistik Teori Dan Aplikasi*. Jakarta : Erlanggn
- Sutrisno, 1997. *Fisika Dasar*. Bandung : ITB
- The Shape Memory Effect*. <http://www.EuroflexGRau.com/gmbh.htm>
- StorkH.1997. *Aufbau Modellbildung und Regelung von Formgedächtnisaktorsystem*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8 Nr 657 Düsseldorf, Germany
- Timoshenko.S.P. dan Goodier.1986. *Teori Elastisitas*. Jakarta : Erlangga

- Timoshenko.S.P dan Gere J.M. 1996. *Mekanika Bahan*. Jakarta : Erlangga
- Tata, Surdia. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakata . Pradnya Paramita
- Tape, Alan. 2005. *An Investigation Of Step Motors, NiTiNOL Actuator wire, and Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) For Use In An Actuated Hand For Use Of The Deaf And Blind*. Jurnal. California Polytechnic State University. Tidak Diterbitkan.
- Van de Mortel, Dirk. 2002. *Exploration Of Smart Material*. Jurnal. Faculty Industrial Design TU. Tidak Diterbitkan.
- Van der eijk, Casper. 2004. *Seismic Dampers Based On Shape Memory Alloys* Proceedings of the Third European Conference on Structural Control. Tidak Diterbitkan
- Varadan. V.K, Vinoy K J, Gopalakrishnan S. 2006. *Smart Material Systems und MEMS Design and Development Methodologies* Chichester. John Wiley&Sons, Ltd.
- Vasina, Michal. 2006. *Untraditional Actuators for Robotic-Shape Memory Alloy*. Jurnal. Dept. of Control and Instrumentation, FEEC, BUT. Tidak Diterbitkan.
- Wijst, van der. *Shape Memory Alloys Featuring NiTiNOL*. 1992. Jurnal. Faculteit der Werktuigbouwkunde. Eindhoveh. Tidak Diterbitkan



2008 01 17

12-01-2008

Lampiran

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Ketua Peneliti:

1. Data Pribadi:	
Nama	: Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE,
Tempat/Tgl. Lahir	: Surabaya, 23 September 1967.
Kelamin	: Laki-Laki
Alamat Rumah	: Jl. MT. Haryono X/1058A Malang, 65144
Telephone	: (0341)581072; HP: 081334295877
Pekeqaan	: Dosen FT Mesin – Universitas Brawijaya MALANG
Pangkat/Gol./NIP	: III ^B /Penata/132137966
Jabatan Fungsional	: Asisten Ahli
Jabatan Struktural	: Sekertaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya
Bidang Yang Sedang Diminati: Teknik Produksi dan Mekatronika	
Mata Kuliah Yang Diasuh: Otomasi Manufaktur, Mekanika Material, Mekatrnika, CAD/CAM, Teknik Instrumentasi, Control System, Finite Element Method.	

2. Riwayat Pendidikan:

Tingkat	: Sarjana (Insinyur)
Brdang	: Teknik Mesin
Tahun Pendidikan	: 1986 – 1491
Nama Institusi	: Universitas Brawijaya MALANG
Tingkat	: Diplom Ingenieur , Master of Science, Doktorand(2 Tahun)
Bidang	: Teknik Produksi(Mechano-Informatics) dan Scientific Computing
Tahun Pendidikan	: 1997-2005
Nama Institusi	: Technical University of Braunschweig GERMANY

3. Pengalaman peneltitan :

1.	Development of Piezoresistive based measurement system for roughness measurement on coated material surface. Federal Institute of Physics and Instrumentation Research(PTB) of Braunschweig, Germany, 1999.
2.	Developing of user material model for composite material bonding of fuselage panel on Airbus A 380. German Aerospace Center(DLR) of Braunschweig, September 2004.
3.	Visual Basic Based Control System of CATIA -V5-Model of Front-Loader Test Station. Institut of Fluid Power and Fluid Machinery at Technical University of Braunschweig, Germany, March 2005.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP ANGGOTA PENELITIAN

1. Data Pribadi:	
Nama	: Sugiarto, ST.,MT.
Tempat/Tgl. Lahir	: Ponorogo/17 April 1969
Kelamin	: Laki-Laki
Alamat Rumah	: Jln K.H. Yusuf RT05/RW04 Tasikmadu – MALANG
Telephone	: 08155506240 – (0341)413306
Pekerjaan	: Dosen FT Mesin – Univenitas Brawijaya MALANG
Pangkat/Gol./NIP	: III ^c /Penata/132137966
Jabatan Fungsional	: Asisten Ahli
Jabatan Struktural	: -
Bidang Yang Sedang Diminati: Perlakuan Panas Pasca Pengelasan, Material Baru, Metalurgi	
Mata Kuliah Yang Diasuh: Ilmu Logam, Mekanika Kekuatan Material, Teknologi Pengelasan Logam.	

2. Riwayat Pendidikan:	
Tingkat	: Sajana (Insinyur)
Bidang	: Teknik Mesin
Tahun Pendidikan	: 1986 – 1993
Nama Institusi	: Universitas Brawijaya MALANG
Tingkat	: Pasca Sarjana (Magister Teknik – S2)
Bidang	: Teknik Mesin
Tahun Pendidikan	: 2000 – 2003
Nama Institusi	: Universitas Gadjah Mada YOGYAKARTA

3. Penelitian Yang Pernah Dilakukan:	
1.	Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Penahanan Terhadap Proses Karburisasi dan Dekarburisasi Baja tahun 1988.
2.	Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Penahanan Terhadap Proses Artificial Aging terhadap Sifat Mekanik Aluminium Paduan (Al-Si) tahun 2000.
3.	Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Pengelasan Terhadap Laju Perambatan Retak Lelah Baja SS 41 tahun 2002
4.	Pengaruh Pengurangan Ketebalan Spesimen Terhadap Sifat Mekanik Hasil Lasan Baja SS 41 Dengan Las TIG tahun 2003
5.	Pengaruh Temperatur Dapur terhadap Kecepatan Pendinginan dan Kekuatan Impak Logam Lasan pada Pengelasan Baja Karbon Rendah tahun 2003.

6.	Pengaruh Variasi Masukan Panas terhadap Ketahanan Korosi Hasil Lasan Stainless Steel dengan Las TIG tahun 2004.
7.	Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Temperatur Awal Pendinginan Dapur Pasca Pengelasan terhadap Sifat Mekanik dan Struktur-mikro Baja SS 41 tahun 2004.
8.	Pengaruh Temperatur dan Waktu Penahanan Proses Artificial Aging terhadap Sifat Mekanik dan Struktur-mikro Aluminium Coran Bekas Piston Sepeda Motor tahun 2005.
9.	Pengaruh Temperatur PWHT terhadap Kekuatan Tarik dan Strukturmikro Daerah Las dan HAZ Aluminium seri Sxxx tahun 2005



DAFTAR RIWAYAT HIDUP ANGGOTA PENELITIAN

1. Data Pribadi:

Nama	: Wisnu Cahya Kurniawan
NIM	: 0310620117-62
Tempat/Tgl. Lahir	: Boyolali, 22 July 1985
Kelamin	: Laki-Laki
Alamat Rumah	: Jl. Kembang Kertas 2 Malang, Jawa Timur 65141
Telephone	: 08155506240 – (0341)413306
Pekerjaan	: Mahasiswa FT Mesin – Universitas Brawijaya MALANG
Bidang Yang Sedang Diminati: Teknik Produksi	

2. Riwayat Pendidikan:

1991-1997	: SD Negeri Pulisen
1997-2000	: SLTP Negeri I Boyolali
2000-2003	: SMU Negeri I Boyolali
2003-2008	: Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang

